



Universidad
Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

HERRAMIENTA PARA EL DISEÑO DE UN RODAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO RADIAL

INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL - PROYECTO FIN DE CARRERA

Autor/es
ALBERTO COBOS ANGÓS

Director/es
JESÚS LETOSA FLETA

Junio 2015



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

**PROPUESTA y ACEPTACIÓN DEL
PROYECTO FIN DE CARRERA DE INGENIERÍA TÉCNICA**

DATOS PERSONALES

APELLIDOS, Nombre
COBOS ANGÓS, Alberto

Nº DNI 73013134-W Dirección Crta Huesca Km 4.4, Bloque 7, 3ªA

C.P. 50015 Localidad Zaragoza

Provincia ZARAGOZA Teléfono 675310171 NIA: 591264

Firma:

DATOS DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL, Especialidad Electrónica Industrial

TITULO

HERRAMIENTA PARA EL DISEÑO DE UN RODAMIENTO ELECTOMAGNETICO RADIAL.

DEPÓSITO EN: ZAGUAN (Obligatorio) ☒ y CD-ROM ☐ (si PFC es tipo B aplicación informática)

DIRECTOR D. JESÚS LETOSA FLETA

VERIFICACIÓN EN SECRETARÍA

El alumno reúne los requisitos académicos (1) para la adjudicación de Proyecto Fin de Carrera

SELLO DEL CENTRO

EL FUNCIONARIO DE SECRETARIA

Fdo.: _____

SE ACEPTA LA PROPUESTA DEL PROYECTO (2)

En Zaragoza, a 21 de Mayo de 2.015

Fdo.: Jesús Letosa Fleta

DIRECTOR DEL PFC

SE ACEPTA EL DEPÓSITO DEL PROYECTO

En Zaragoza, a 21 de Mayo de 2.015

Fdo.: Jesús Letosa Fleta

DIRECTOR DEL PFC

(1) Requisitos académicos: tener pendientes un máximo de 24 créditos o dos asignaturas para finalizar la titulación.

(2) Para que la propuesta sea aceptada por el Director, es imprescindible que este impreso esté sellado por la Secretaría de la EINA una vez comprobados los requisitos académicos.

INDICE

LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE TABLAS	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. SIMULACION DE UN RODAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO MEDIANTE FEMM ...	11
2.1 DISEÑO DE UN RODAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO ACTIVO RADIAL CON FEMM 2D. ...	11
2.1.1 EXPLICACION DETALLADA DE LAS PARTES DEL RODAMIENTO ELECTROMAGNETICO SIMULADO.....	11
2.1.2 ESQUEMAS DE DISEÑO	12
3. VALIDACION DEL MODELO EN FEMM	16
3.1 DIMENSIONES Y CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO EN FEMM	16
3.2 VALIDACION DEL MODELO.....	19
3.3 COMPROBACION DE LOS COEFICIENTES DE RIGIDEZ ESTÁTICA K_{xo} y K_{io}	21
4. DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE DISEÑO PARAMETRIZADO	23
4.1 OCTAVE COMO HERRAMIENTA DE PROGRAMACIÓN.....	23
4.1.1 BREVE DESCRIPCION DE FUNCIONAMIENTO	23
4.1.2 QUE ES UN SCRIPT PARA OCTAVEFEMM Y COMO SE EJECUTA	23
4.2 DESCRIPCION DE SCRIPTS DE DISEÑO Y POSTPROCESADO.....	23
4.2.1 SCRIPT DE DISEÑO DE RODAMIENTO ELECTROMAGNETICO DE N POLOS.....	24
4.2.2 SCRIPT DE POSTPROCESADO PARA CAMBIOS DE POSICION DEL ROTOR.....	27
5. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA FUERZA SOBRE EL ROTOR EN FUNCIÓN DE VARIACIONES DIFERENCIALES DE CORRIENTE EN DOS GRUPOS DE BOBINAS EN HERRADURA.....	30
6. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA FUERZA SOBRE EL ROTOR CUANDO SE DESPLAZA HACIA 2 BOBINAS EN HERRADURA.	34
7. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE DISEÑO.....	38
7.1 DISEÑO DE UN RODAMIENTO CON UN REQUERIMIENTO ESPECÍFICO DE FUERZA NOMINAL.....	38
7. CONCLUSION.	42
8. BIBLIOGRAFIA.....	43
9. ANEXOS	45
9.1 INTERFAZ GRAFICO PARA OCTAVE.....	45

9.2 PROGRAMACION EN OCTAVE	47
9.3 VISUALIZACION DEL SCRIPT PRINCIPAL DEL DISEÑO DEL RODAMIENTO.	49
9.4 DESCRIPCION DE COMANDOS PARA INTERAPTUAR OCTAVE CON FEMM EN EL SCRIPT PRINCIPAL.....	50
9.5 SCRIPTS DE DISEÑO Y POSTPROCESADO	51
9.5.1 SCRIPT PRINCIPAL	51
9.5.2 CARGAR LAS VARIABLES DEL RODAMIENTO.....	52
9.5.3 SCRIPT DE DIBUJO DE RODAMIENTO.....	52
9.5.4 CARGAR MATERIALES CONFIGURACIONES Y DEMAS CONDICIONES TÉCNICAS.	54
9.5.5 VARIACIONES DIFERENCIALES DE CORRIENTE	56
9.5.6 DESPLAZAMIENTO DEL ROTOR HACIA LA BOBINA.....	59
9.6 IMÁGENES RODAMIENTO EXPERIMENTAL DE 8 POLOS	62

LISTA DE FIGURAS

-	
Figura 1 - Comparación rodamiento mecánico y electromagnético.....	7
Figura 2 Esquema simplificado de control de un rodamiento electromagnético.....	9
Figura 3 Ventana de Definición de Problema en FEMM	12
Figura 4 Esquema de partes principales del rodamiento electromagnético a diseñar.....	13
Figura 5 Imagen del rodamiento de 8 polos experimental	14
Figura 6 Esquema de diseño del rodamiento con variables geométricas.....	16
Figura 7 Gráfica de curva de magnetización del material M_270	18
Figura 8 Mallado en FEMM	19
Figura 9 Diseño a Validar en FEMM, imágenes de pre y post procesado	20
Figura 10 Resultado de una simulación en FEMM	25
Figura 11 Resultado de una simulación en FEMM	26
Figura 12 Resultado de una simulación en FEMM	26
Figura 13 Gráfica 3D que muestra la Fuerza en ambos ejes en relación al desplazamiento del rotor, para una corriente de 2A	28
Figura 14 Resultados del post-procesado de cambios de posición, para desplazamientos en el eje x e y positivos	29
Figura 15 Configuración del rodamiento para la simulación de variaciones de corriente	30
Figura 16 Gráfica de la fuerza sobre el rotor por las variaciones de corriente.....	32
Figura 17 Resultados de la simulación en el post-procesado de FEMM.....	33
Figura 18 Gráfica de la fuerza ejercida sobre el rotor por las variaciones de posición para una corriente de 1.33 A.....	36
Figura 19 Resultados de simulación de movimiento del rotor en post-procesado de FEMM....	37
Figura 20 Esquema acotado de rodamiento de 8 polos experimental.	38
Figura 21 Izq- Rodamiento con dimensiones originales, Drcha- Rodamiento con reducción del 25% y nuevo Gap.....	39
Figura 22 Izq- Rodamiento con dimensiones originales, Drcha- Rodamiento con reducción del 50% y nuevo Gap.....	40
Figura 23 Interfaz de usuario de QtOctave2	46
Figura 24 Bucle de programación en Octave	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Variables geométricas para definir el rodamiento a diseñar	15
Tabla 2 Variables geométricas a definir para la validación del modelo	17
Tabla 3 Variables de configuración a definir para la validación del modelo	17
Tabla 4 Variables técnicas específicas para la validación del modelo	17
Tabla 5 Materiales para la validación del modelo	17
Tabla 6 Cálculos de mallado para la validación	18
Tabla 7 Comparación de F_y para validación del modelo	20
Tabla 8 Comparación de valores de B en el entrehierro	21
Tabla 9 Coeficientes de rigidez estática calculados	22
Tabla 10 Scripts de diseño	25
Tabla 11 Variables para definir script de post-procesado	27
Tabla 12 Variables que registran la fuerza en ambos ejes	27
Tabla 13 Variables que registran el desplazamiento del rotor en ambos ejes	28
Tabla 14 Variables a definir para la simulación	31
Tabla 15 Resultados numéricos obtenidos de la simulación	33
Tabla 16 Variables a definir para simulación de cambios de posición del rotor	34
Tabla 17 Configuración del rodamiento para simulación de movimiento del rotor	35
Tabla 18 Resultados numéricos de la simulación de movimiento del rotor	37
Tabla 19 Variables de diseño para simulación cambio de dimensiones.	39
Tabla 20 Resultados de los cálculos de nuevo Gap	40
Tabla 21 Variables para reducción del 50% en las dimensiones geométricas.	40
Tabla 22 Resultados de cálculos del Gap para reducción del 50%	41
Tabla 23 Comandos del script principal	50

1. INTRODUCCIÓN

Un rodamiento magnético es un dispositivo conformado por una colección de electroimanes, los cuales tienen como objetivo remplazar las partes mecánicas, como rodillos o esferas metálicas, que integran comúnmente a los rodamientos mecánicos mediante la aplicación de fuerzas electromagnéticas. La finalidad de ello es permitir el movimiento del rotor sin la necesidad de que exista contacto físico.

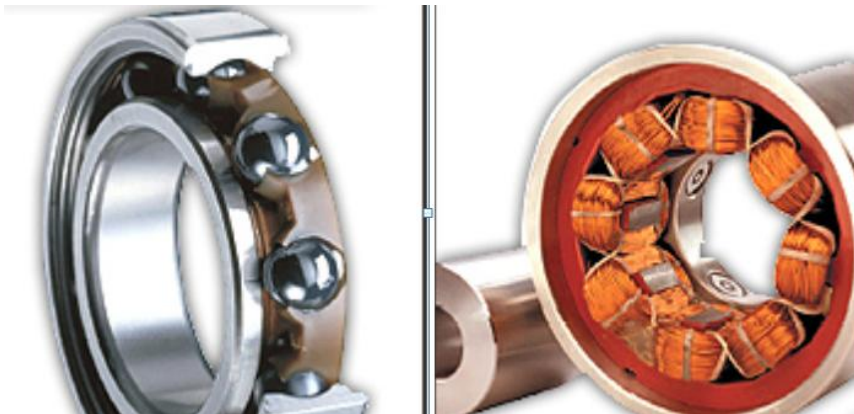


Figura 1 - Comparación rodamiento mecánico y electromagnético.

Los rodamientos magnéticos activos (AMB's, por sus siglas en inglés), forman parte de una de las aplicaciones de la levitación magnética, y en los últimos años han cobrado una gran importancia, debido a las ventajas que ofrecen en comparación a los rodamientos mecánicos.

Dentro de estas ventajas que ofrecen los AMBs se mencionan las siguientes:

- No requiere el uso de lubricantes. Esto posibilita su aplicación en procesos en donde la contaminación de estos agentes es perjudicial. Por ejemplo, en aplicaciones al vacío, procesos químicos, biológicos, farmacéuticos, etc.
- Reducción en las pérdidas por fricción. Lo que proporciona al rodamiento una mayor durabilidad, llegando a ser de cinco a veinte veces menores tales pérdidas.
- Reducción en los costos por mantenimiento.
- Aislamiento de la vibración. El espacio libre existente entre el rotor y el resto de la máquina, permite aislar la vibración además del ruido. Este espacio puede aprovecharse en algunas aplicaciones en donde se requiera la circulación de fluidos. Las dimensiones del espacio libre existente entre el rotor y el rodamiento (denominado gap, en inglés) es del orden de décimas de milímetro, sin embargo, para algunas aplicaciones puede llegar hasta los 20 milímetros.

- Altas velocidades de operación (hasta de 60000rpm). Los AMBs son idóneos para aplicaciones en donde se requieran altas velocidades de giro, por ejemplo, en generadores, turbinas y equipos aeroespaciales.

Podemos distinguir dos tipos principales de rodamientos magnéticos, activos y pasivos. Los rodamientos magnéticos pasivos generalmente utilizan imanes permanentes (también existen de superconductores, corrientes inducidas etc.) y por lo tanto no requieren de suministro eléctrico, pero conllevan una mayor complejidad de diseño, por lo tanto, la mayoría de los rodamientos magnéticos son rodamientos magnéticos activos, que usan electroimanes que requieren del suministro continuo de potencia eléctrica y un sistema de control activo para mantener estable a la carga. Podemos encontrar en algunas ocasiones diseños combinados de rodamientos activos y pasivos.

Este trabajo se basa en el principio de los rodamientos magnéticos activos o también llamados cojinetes magnéticos activos. La atracción producida por los diferentes campos electromagnéticos generados en las bobinas, es el principio por el cual se logra la sustentación del eje. El proceso completo de funcionamiento, implica la medida y control del valor del entrehierro (Gap); cuando éste es mayor al deseado se incrementa el voltaje en la bobina o bobinas correspondientes, por lo tanto, la corriente se incrementa, igual que la densidad " J "; como resultado " B " aumenta y la fuerza magnética aplicada sobre el rotor también.

Este proceso se repite hasta alcanzar el entrehierro deseado. La vigilancia y toma de decisiones es realizada por un algoritmo de control, que puede ser implementado en una tarjeta electrónica o en un PC.

Para conseguir que el sistema sea estable, se necesitan añadir unos sensores de posición alrededor del rotor que midan el estado del mismo. Esta información se usa como realimentación para que el controlador pueda enviar la señal de control a los amplificadores y de ahí la corriente necesaria a las bobinas para así mantener la estabilidad del eje.

Un esquema de control simplificado podría ser el que aparece en la figura 2:

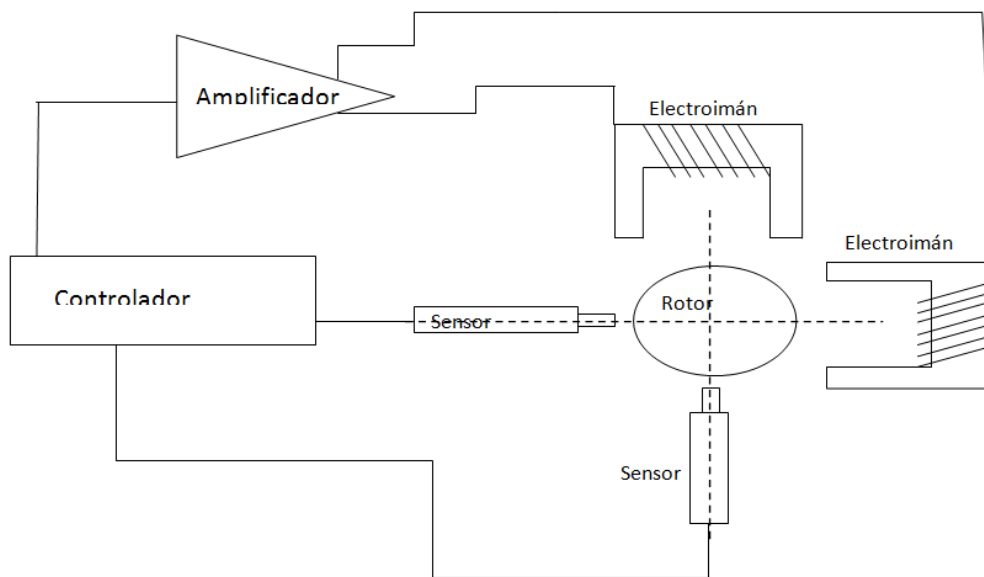


Figura 2 Esquema simplificado de control de un rodamiento electromagnético

Este sistema plantea una necesidad fuerte de control, y por lo tanto de una excitación externa que lo mantenga activo. Tienen que estar protegidas correctamente para evitar el fallo y establecer medidas de seguridad para proveer alimentación eléctrica ininterrumpida, ya que, sin suministro eléctrico, los cojinetes no actuarían sobre el rotor eliminando los soportes del mismo permitiendo moverse libremente lo que puede conllevar daños graves al sistema.

A continuación, se describen brevemente los elementos de este sistema de control:

- Sensor de posición: mide la desviación entre la posición deseada del rotor y la posición actual y transmite dicha información al controlador.
- Controlador: se encarga de mantener la posición del rotor en el valor deseado. Envía una señal de posición del rotor al amplificador de potencia.
- Rotor: es la masa que se pretende sustentar en una posición determinada.
- Amplificador de potencia: recibe la señal del controlador y la transforma en una corriente eléctrica para que circule por la bobina. Esa bobina será la encargada de generar la fuerza magnética al rotor.

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera es desarrollar una herramienta para el modelado de rodamientos magnéticos activos de fuerza radial. Con el modelo desarrollado, se estudian las prestaciones de este tipo de rodamiento frente a variaciones de algunos de los parámetros que lo definen.

Los problemas que se afrontan, y objetivos de este PFC son los siguientes:

- Una breve descripción sobre los las ventajas de estos rodamientos, así como los diferentes tipos y los principios básicos de funcionamiento.
- Diseño de un modelo electromagnético del cojinete magnético activo radial mediante un programa de elementos finitos en 2D que permita analizar su funcionamiento.
- Validación del modelo propuesto en FEMM (Finite Element Method Magnetics) con datos experimentales obtenidos en un rodamiento de laboratorio.
- Aprovechando la disponibilidad de datos experimentales obtenidos en un modelo de rodamiento electromagnético radial de 8 polos en herradura se realizará un estudio paramétrico del comportamiento del modelo con la variación de algunos de los parámetros que constituyen al cojinete magnético.
- Aplicaciones de la herramienta desarrollada para obtener distintos rodamientos con requerimientos específicos.

Después de esta introducción, en primer lugar desarrollaremos un modelo de simulación para un rodamiento electromagnético radial, basado en los modelos de [2], utilizando el programa FEMM.

Posteriormente pasaremos a validar el modelo propuesto, comparándolo con datos obtenidos en un cojinete experimental. Para ello se han calculado coeficientes de rigidez estática, campos magnéticos que atraviesan el Gap, fuerzas ejercidas sobre el rotor, y tamaños de mallado del modelo.

Una vez validado el modelo, pasaremos a explicar una serie de scripts de diseño y cálculos de post-procesado, ejecutados a través del programa Octave y que permiten el diseño y posterior cálculo de fuerzas en el rotor en diferentes modelos de cojinetes parametrizados.

Después de esto, realizaremos una serie de estudios paramétricos sobre el comportamiento de un modelo de rodamiento activo radial de 8 polos en herradura, ante variaciones de algunos valores como Gap o corriente por las bobinas.

Por último desarrollaremos una serie de aplicaciones del script de diseño que nos permitirán modelar cojinetes con diferentes requerimientos específicos.

2. SIMULACION DE UN RODAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO MEDIANTE FEMM

2.1 DISEÑO DE UN RODAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO ACTIVO RADIAL CON FEMM 2D.

En este trabajo se estudian modelos de rodamiento magnético activo radial en 2D mediante FEMM, para analizar su comportamiento electromagnético. FEMM es un programa que se basa en el cálculo de elementos finitos para simular circuitos electromagnéticos y electroestáticos y otros, con geometría 2D cartesiana o axi-simétrica. Permite cálculos y obtención de gráficas de pre y post procesado. En el caso que nos ocupa, trataremos de simular un modelo 2D con geometría cartesiana, en el que se incluye una variable de dimensión en el “eje z” que permite realizar diferentes cálculos mediante integrales de volumen.

2.1.1 EXPLICACION DETALLADA DE LAS PARTES DEL RODAMIENTO ELECTROMAGNETICO SIMULADO.

Se pretende modelar un rodamiento magnético activo radial cuya estructura está compuesta por un rotor, un disco estático exterior con un número n de polos acoplados al disco con sus respectivas bobinas, y un entrehierro. Estas partes constituyen el circuito magnético del modelo, cuyas características se citan a continuación:

- **Rotor:** es un cilindro de material (ferromagnético) que se sitúa en torno al eje del diseño. El rotor no permanece estático, ya que gira sobre su eje en el interior del rodamiento. Es la parte del cojinete que se mantiene en suspensión por el efecto de las bobinas.
- **Entrehierro:** es el medio material no magnético que separa el rotor de los polos del estator, esta distancia entre rotor y polos viene definida por el Gap. En este caso, el medio material del entrehierro es el aire.
- **Estator:** se trata del disco de material ferromagnético que rodea el rotor. Soporta las bobinas que crean el campo electromagnético que sostiene en levitación al rotor. El estator está compuesto por un disco exterior, y una serie de n polos, alrededor de los cuales se arrollan las bobinas.
- **Bobinas:** son las encargadas de crear el campo electromagnético que permite el funcionamiento del rodamiento. Se trata de cable de cobre enrollado alrededor de un núcleo, en este caso el núcleo es el polo del estator de material ferromagnético.

Nuestro modelo deberá tener todas estas partes descritas, para ello será necesario conseguir un diseño geométrico en FEMM que nos permita diferenciar todos los elementos, para aplicar a cada uno unas condiciones y características técnicas específicas.

Además, tendremos que definir otros aspectos del modelo, como son el tipo de geometría, las unidades de medida, la profundidad etc.

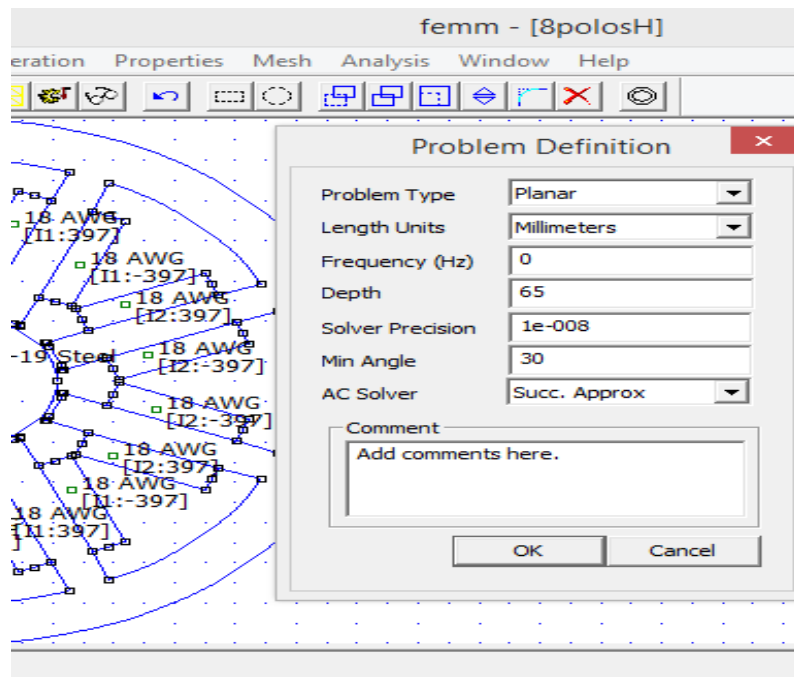


Figura 3 Ventana de Definición de Problema en FEMM

Todas estas variables, se definen en el menú de pre-procesado en FEMM, a través del comando “Problem Definition” (definición de problema). Como podemos observar en la figura 3 , en nuestro caso debemos seleccionar en tipo de problema la opción “Planar” para que nuestro problema tenga geometría cartesiana, la otra opción a seleccionar sería geometría axi-simetrica o geometría de revolución, pero en este caso no nos interesa. En el siguiente paso deberemos seleccionar la unidad de medida del problema, en nuestro caso milímetros. Por último, es importante especificar en el apartado “Depth” la profundidad del modelo que queremos diseñar, es decir la magnitud en el eje z que tendrá nuestro diseño. El resto de parámetros no será necesario modificarlos para una correcta modelización.

2.1.2 ESQUEMAS DE DISEÑO

A continuación se muestran una serie de dibujos esquemáticos de diseño del cojinete, especificando las diferentes partes que componen el rodamiento electromagnético:

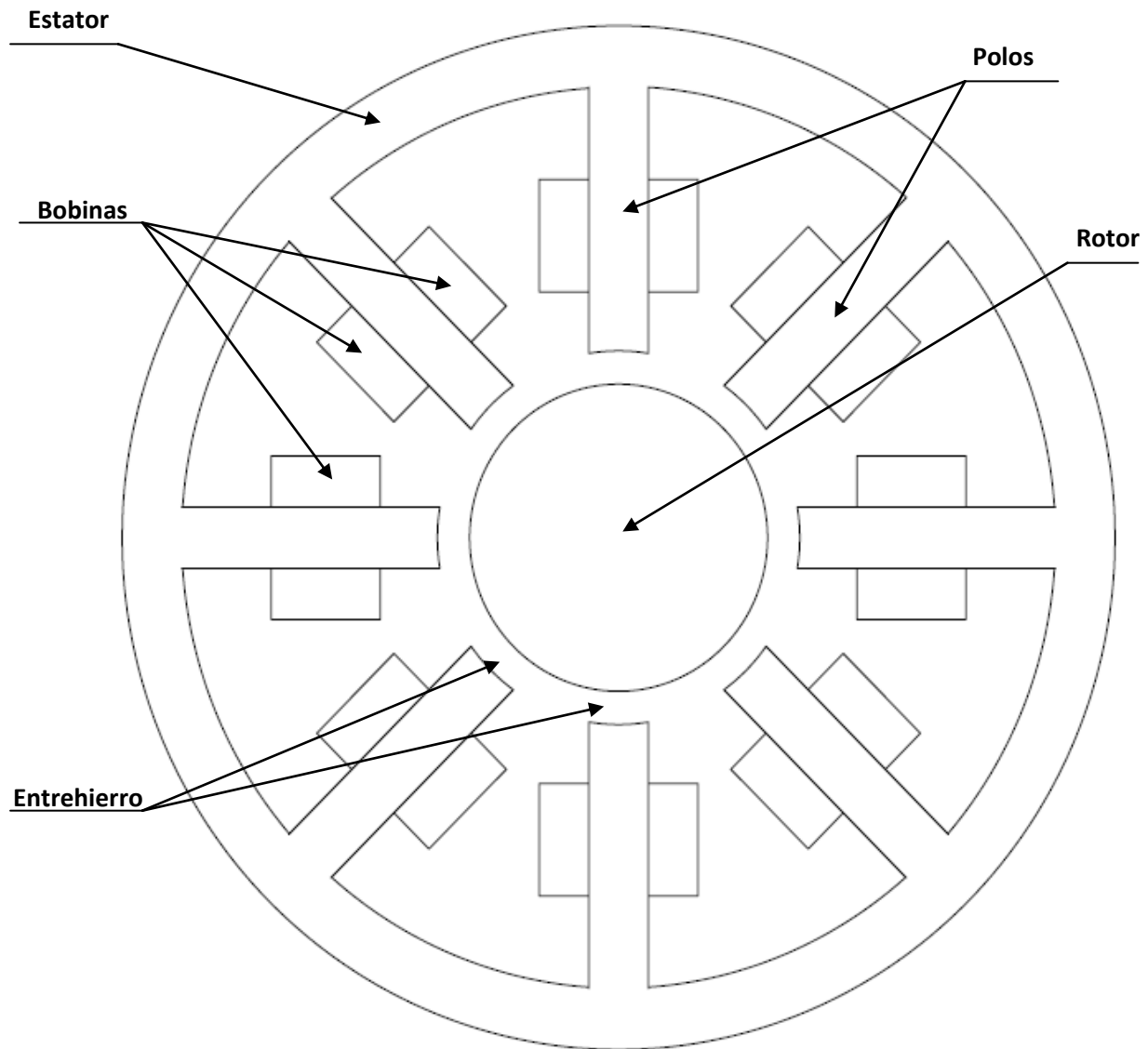


Figura 4 Esquema de partes principales del rodamiento electromagnético a diseñar.



Figura 5 Imagen del rodamiento de 8 polos experimental

Para realizar los diseños en el programa de elementos finitos, se ha utilizado el programa Octave, que permite ejecutar una serie de scripts con comandos que interactúan con FEMM. En el apartado 4 de este PFC se explica de forma más detallada como funciona Octave y los script de diseño. Por ahora será suficiente decir, que para el diseño del cojinete en FEMM tenemos una serie de variables, que permiten al usuario modelar el rodamiento a su voluntad. Estas variables se configuran en el script denominado “Cargar_Variables_Rodamiento”, y permiten parametrizar tanto las dimensiones geométricas, como los materiales, los valores de corriente por las bobinas, así como la configuración de los polos.

En la figura 6 podemos observar esquemáticamente que parámetro modifica cada variable, y en la tabla 1 una pequeña descripción de las mismas:

Variables	Descripción
(1) Variable.Radorotor	Define el radio del rotor interior
(2)Variable. Radioexterior	Define el radio de la circunferencia exterior del estator
(3)Variable.Gap	Define la distancia entre el rotor y los polos
(4)Variable.Anchopolo	Define la anchura de los polos
(5)Variable.Anchobobina	Define la anchura de las bobinas acopladas a los polos
(6)Variable.Anchoexterior	Define la anchura del estator
Variable.Nopolos	Define el numero de polos del diseño
Variable.Configuracion	Define la configuración del rodamiento como 8 polos en herradura

Variable.Corriente	Define la corriente a través de las bobinas
Variable.Noespiras	Define en numero de espiras de la bibina
Variable.Mallado	Define la distancia entre el rotor y los polos

Tabla 1 Variables geométricas para definir el rodamiento a diseñar

3. VALIDACION DEL MODELO EN FEMM

3.1 DIMENSIONES Y CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO EN FEMM

La validación del modelo diseñado para FEMM es importante por los siguientes motivos:

- Asegurar que el modelo diseñado se comporta de manera similar a un sistema real, con una precisión suficiente.
- Aumentar la fiabilidad del modelo, para poder tomar posteriormente, decisiones de diseño en base a los resultados obtenidos en la misma.

En primer lugar, describiremos las dimensiones y características de materiales que vamos a utilizar para la simulación y posterior validación del modelo. Las variables que podemos utilizar para imitar el diseño que tenemos de referencia son las detalladas en el siguiente esquema:

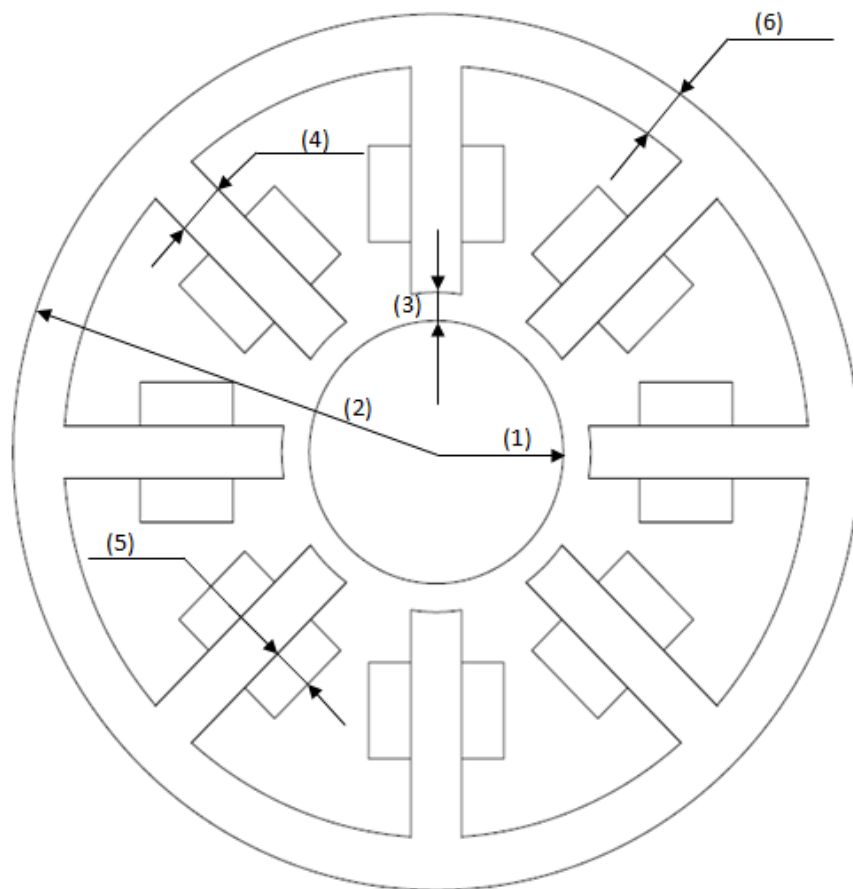


Figura 6 Esquema de diseño del rodamiento con variables geométricas

En la tabla 2, podemos observar las medidas utilizadas para diseñar el rodamiento que queremos usar para la validación del modelo:

Variables	Valor(mm)
(1) Variable.Radiorotor	21
(2)Variable. Radioexterior	85
(3)Variable.Gap	1,5
(4)Variable.Anchopolo	9,6
(5)Variable.Anchobobina	10
(6)Variable.Anchoexterior	14
Variable.Depth	64

Tabla 2 Variables geométricas a definir para la validación del modelo

Podemos ver estas dimensiones también en la figura 20.

Además, para que el programa configure correctamente el diseño que queremos validar, será necesario situar los siguientes valores en otras dos variables:

Variables	Valor
Variable.Nopolos	8
Variable.Configuracion	1

Tabla 3 Variables de configuración a definir para la validación del modelo

Después de establecer las dimensiones del modelo de elementos finitos se procede a aplicarlos materiales y otros parámetros al modelo geométrico.

Variables	Valor
Variable.Corriente	4
Variable.Noespiras	300
Variable.Mallado	0.9

Tabla 4 Variables técnicas específicas para la validación del modelo

La tabla 5 expresa los materiales y características técnicas que contiene cada material asignado al modelo en *FEMM*.

Materiales	Datos material	Area de aplicación
Copper (cobre)	Conductividad Eléctrica= $58 (\Omega \cdot m)^{-1}$	Bobinas
M_270	*Curva magnetización figura 7	Estator, polos y rotor
Air (aire)	Permeabilidad relativa= 1	Entrehierro

Tabla 5 Materiales para la validación del modelo

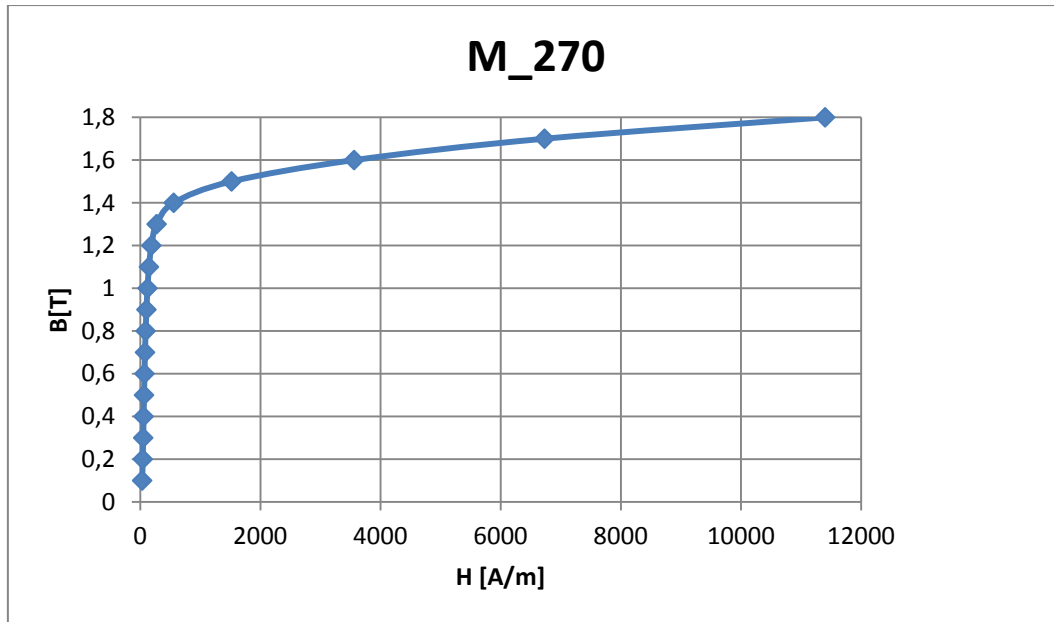


Figura 7 Gráfica de curva de magnetización del material M_270

Después de haber definido las variables de diseño geométrico y materiales, debemos considerar el tamaño de mallado más adecuado para realizar nuestras simulaciones. Para elegir este tamaño más adecuado, debemos tener en cuenta el error que se produce entre tamaños de mallado, partiendo de uno pequeño de 0.2 que tomaremos como referencia. Como medida para comparar errores, utilizaremos la fuerza que ejerce la herradura superior sobre el rotor cuando esta activada a 4 A como se muestra en la figura 9.

La tabla 6 muestra los resultados obtenidos en esta comprobación:

Tamaño del mallado (mm)	Fy (N)	Error
0.2	282,415	-
0,3	282,432	0.0061%
0,6	282,569	0.0555%
0,9	282,541	0.0604%
3	282,629	0.0771%
9	282,629	0.0771%
Automesh	282,629	0.0771%

Tabla 6 Cálculos de mallado para la validación

Para valores de 0.3 mm y 0.6 mm el error es ligeramente inferior, pero los tiempos de cálculo de FEMM son demasiado elevados y no sería posible realizar las simulaciones más complejas. Desde nuestro punto de vista no consideramos eficiente seleccionar un tamaño de mallado más pequeño a 0.9 mm porque el elevado tiempo de cálculo no compensa por el menor error que podemos obtener en los resultados.

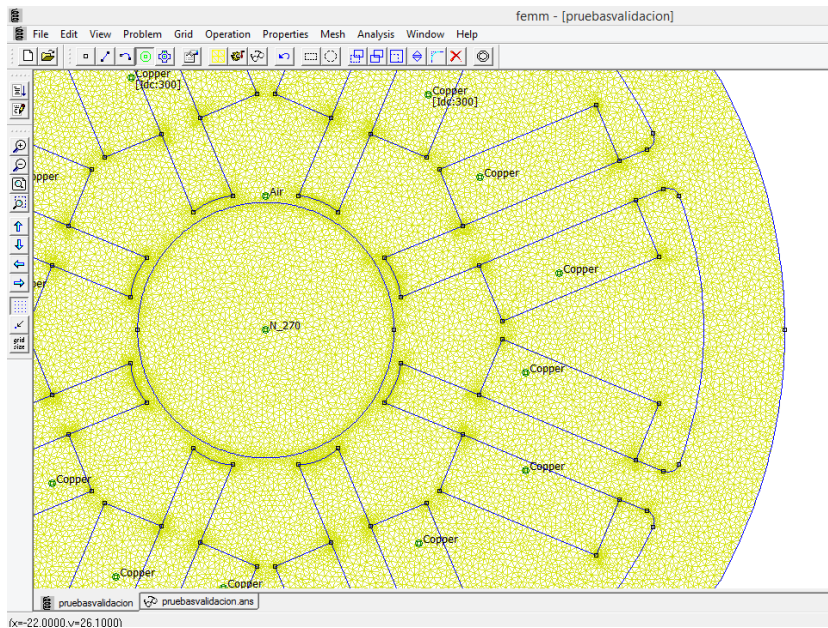


Figura 8 Mallado en FEMM

3.2 VALIDACION DEL MODELO.

Una vez definidas todas las variables necesarias para un correcto diseño del rodamiento que queremos validar, es momento de realizar una serie de simulaciones, que nos permitan comparar los datos obtenidos en las mismas con datos ya comprobados de otros modelos de la misma geometría.

Para esta primera validación, realizaremos una simulación programada a través de la cual variaremos la corriente por dos bobinas configuradas como una herradura, con un aumento progresivo de 0.33 Amperios, y analizaremos la fuerza que ejerce dicha herradura sobre el rotor del rodamiento. Los datos se compararan con los obtenidos en un modelo experimental de las mismas dimensiones y características técnicas.

La tabla 7, muestra los resultados obtenidos con FEMM de la fuerza ejercida en el eje y sobre el rotor, comparándolas con diferentes resultados experimentales, y un resultado obtenido en un modelo 3D realizado con el programa Opera de las mismas características. La fuerza experimental se ha obtenido haciendo la media aritmetica de 3 valores obtenidos en laboratorio. Para las medidas experimentales se utilizó una

máquina de tensión compresión INSTRON 5565, con software de control electromecánico que permite desplazamientos controlados del orden de decenas de micras equipada con una celda de carga para la medida de la fuerza. La máquina desplazaba el rotor respecto al estator, fijado con utillajes especiales diseñados para el caso.

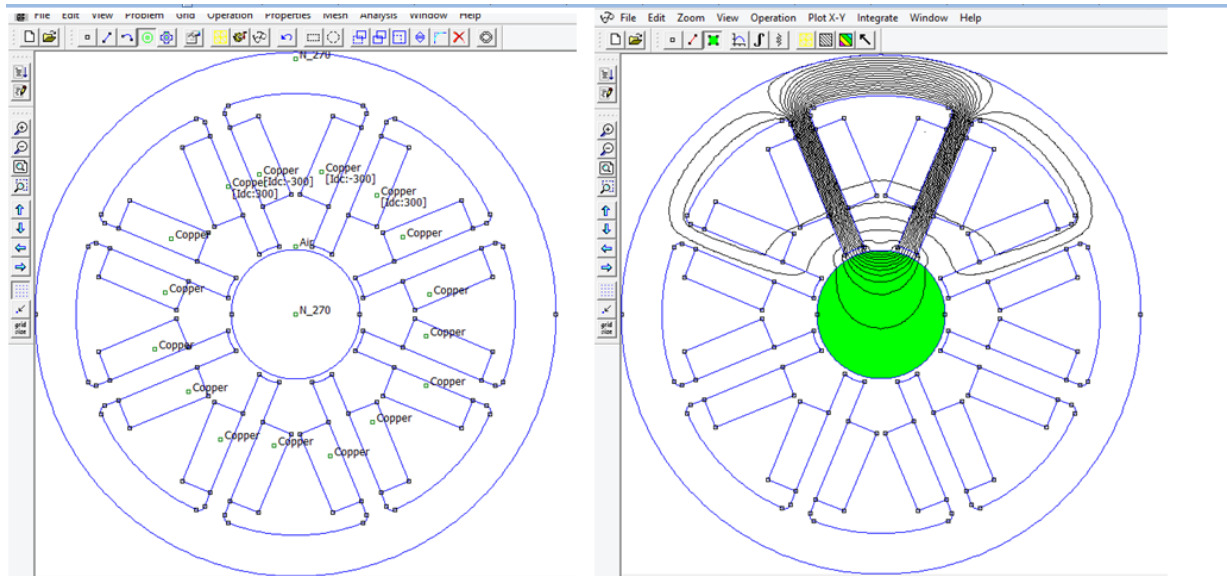


Figura 9 Diseño a Validar en FEMM, imágenes de pre y post procesado

I_{exc}(A)	F_y(N) Modelo 3D	F_y exp media (N)	F_y(N) nuestro modelo	%VarF
0,33	3,89	4,4678	3,20256	28,318%
0,67	15,91	12,234	13,4546	-9,971%
1	36,05	28,731	30,1983	-5,103%
1,33	64,09	49,993	53,5902	-7,194%
1,67	99,37	75,995	84,5451	-11,249%
2	139,73	109,499	120,998	-10,501%
2,33	177,47	151,473	162,262	-7,122%
2,67	205,08	188,496	200,213	-6,216%
3	227,27	216,499	221,019	-2,087%
3,33	246,61	239,499	247,284	-3,250%
3,67	264,07	259,998	265,849	-2,250%
4	276,36	279,552	282,541	-1,088%

Tabla 7 Comparación de F_y para validación del modelo

A la vista de los resultados obtenidos, la fuerza resultante de nuestra simulación tiene desviaciones relativamente pequeñas con las obtenidas experimentalmente, especialmente en rangos de corrientes elevadas cercanas a la máxima que soportan las bobinas.

Podemos calcular también, gracias a las herramientas de post-procesado de FEMM el campo magnético en el Gap del modelo simulado, y compararlo con datos obtenidos experimentalmente en el modelo de las mismas características y medidas.

I ex (A)	B exp Gap (T)	B femm Gap (T)	Error
0,33	0,08	0,068	15%
0,66	0,162	0,1381	14,75%
1,33	0,325	0,279	14,15%
2,33	0,556	0,485	12,76%
3,33	0,66	0,606	8,18%
4	0,7	0,663	5,28%

Tabla 8 Comparación de valores de B en el entrehierro

De nuevo podemos observar que los errores no son excesivamente elevados, siendo más pequeños a medida que aumenta la corriente.

3.3 COMPROBACION DE LOS COEFICIENTES DE RIGIDEZ ESTÁTICA K_{x0} y K_{io}.

Los coeficientes de rigidez estática K_{io} y K_{x0} a frecuencia cero, son importantes porque se toman como referencia para muchos cálculos en el diseño del cojinete magnético.

La expresión del coeficiente de rigidez estática K_{io} es de la siguiente manera cuando la frecuencia es cero:

$$k_{io} = \frac{dF}{dI}$$

$$k_{io} = \frac{162.25 \text{ N} - 120.99 \text{ N}}{2.33 \text{ A} - 2 \text{ A}} = 125.03 \text{ N/A}$$

Hemos obtenido la rigidez estática en el entorno de 2 A, ya que en las simulaciones posteriores utilizaremos 2 amperios como corriente de polarización.

La expresión del coeficiente de rigidez estática K_{x0} es de la siguiente manera cuando la frecuencia es cero

$$k_{xo} = \frac{dF}{dX}$$

$$k_{xo} = \frac{120.99 \text{ N} - 86.63 \text{ N}}{0.3 \text{ mm}} = 114.53 \text{ N/mm}$$

Se ha estudiado la rigidez estática en el entorno de la posición central (0,0), ya que en la simulación posterior se realizara un estudio de cálculo de fuerzas tras desplazamientos del rotor sobre la posición central.

Coefficiente de rigidez estatica	Valor experimental	Valor calculado	Error
Kio	121.08 N/A	125.03 N/A	-7,58 %
Kxo	125,97 N/m	114,53 N/m	9,08 %

Tabla 9 Coeficientes de rigidez estática calculados

4. DESCRIPCION DEL PROGRAMA DE DISEÑO PARAMETRIZADO

4.1 OCTAVE COMO HERRAMIENTA DE PROGRAMACIÓN.

4.1.1 BREVE DESCRIPCION DE FUNCIONAMIENTO

El programa que hemos utilizado para el desarrollo de los scripts es el software *Octave* [10], más concretamente la versión de *QtOctave* porque es capaz de interactuar con *FEMM v4.2* y por su capacidad para realizar cálculos y gráficas necesarios para mi proyecto. El script en *Octave* relaciona dicho programa con el programa de elementos finitos llamado *FEMM*. Este script tiene como objetivo el diseño programado de un cojinete magnético radial y posteriormente realizar una serie de simulaciones para resolver diferentes problemas.

A continuación explicaremos brevemente que es *Octave* ya que es uno de los programas utilizado en el desarrollo de este proyecto.

Octave o *GNU Octave* es un programa libre para realizar cálculos numéricos. Como indica su nombre es parte de proyecto *GNU*. *MATLAB®* es considerado su equivalente comercial. *Octave* no es un sistema de álgebra computacional como podría ser *Maxima*, sino que usa un lenguaje que está orientado al análisis numérico.

La descripción del algoritmo de *Octave* se puede dividir en tres partes: la interfaz gráfica para *Octave* (*QtOctave*) (ver Anexo 9.1), el contenido del algoritmo y los resultados que aporta el mismo.

4.1.2 QUE ES UN SCRIPT PARA OCTAVEFEMM Y COMO SE EJECUTA

Un script es un pequeño código que sigue una serie de comandos escritos en un lenguaje de programación. Nuestro caso está escrito en un fichero de texto pero con extensión *.m que después será ejecutado en *Octave*.

La función de nuestro script es diseñar y representar un rodamiento magnético parametrizado, como el que hemos visto anteriormente, en función de los datos introducidos por el usuario. Se han diseñado una serie de scripts para *Octave*, la finalidad de estos script es conseguir una herramienta de diseño que permita programar un rodamiento electromagnético con una serie de variables introducidas por el usuario entre las que se encuentran el número de polos, las dimensiones de rotor y estator, la configuración de las bobinas, la corriente que circula por ellas o los materiales a utilizar.

4.2 DESCRIPCION DE SCRIPTS DE DISEÑO Y POSTPROCESADO

A continuación se explican detalladamente los scripts programados para este proyecto. Cada uno de ellos se compone de otros que actúan como subrutinas con

diferentes funciones como aplicar materiales, condiciones de contorno, o establecer las dimensiones del rodamiento.

4.2.1 SCRIPT DE DISEÑO DE RODAMIENTO ELECTROMAGNETICO DE N POLOS

El script de diseño de rodamiento tiene como objetivo dibujar, aplicar los materiales a cada parte del rodamiento, aplicar las condiciones de contorno y finalmente obtener como resultado el rodamiento definido por el usuario.

Este script denominado Principal.m está compuesto a su vez de otros pequeños programas o subrutinas a los que recurre para completar el diseño del rodamiento requerido. En los anexos de este trabajo puede observarse la configuración de este script Principal.

Para ejecutarlo, es necesario en primer lugar abrir el fichero *.m usando el icono:



Posteriormente, y para completar la ejecución se pulsara el icono:



El programa Principal comienza indicando la ruta de trabajo a Octave mediante el comando:

```
addpath ("C:\\*");
```

Después se define una serie de subprogramas que se han detallado en la Tabla 10

Comando	Descripción
Cargar_Variables_Rodamiento	Este comando define todas las Variables que son necesarias para el diseño del rodamiento, tanto a nivel de geometría como de materiales y demás condiciones técnicas. Debería ser el único script que manipularía el usuario.
Dibujar_Geometrias_Rodamiento	Utiliza los datos introducidos en el script anterior para dibujar las geometrías del rodamiento en FEMM
Materiales_y_Condiciones_de_Contorno	Solo se aplica en el caso de que la Variable de configuración este en el modo “polos independientes”. Es el encargado de definir los materiales de cada región, así como el tamaño del mallado, las condiciones de contorno o las

corrientes a través de las bobinas.

Materiales_y_Condiciones_Herradura

Solo se aplica en el caso de que la Variable de configuración esté en el modo “polos en Herradura”. Es el encargado de definir los materiales de cada región, así como el tamaño del mallado, las condiciones de contorno o las corrientes a través de las bobinas.

Tabla 10 Scripts de diseño

El siguiente paso es comunicarse con el programa de elementos finitos FEMM v4.2 mediante una serie de comandos (ver anexos).

Cuando todos los scripts anteriores se han ejecutado correctamente, actúan los comandos de post-procesado, encargados de analizar y mostrar los resultados obtenidos de la simulación. Estos comandos son:

- `Mi_analyze(0);`
- `Mi_loadsolution;`

Una vez se ha ejecutado por completo el Programa_Principal.m , FEMM debería mostrar el siguiente resultado en el interfaz de post-procesado:

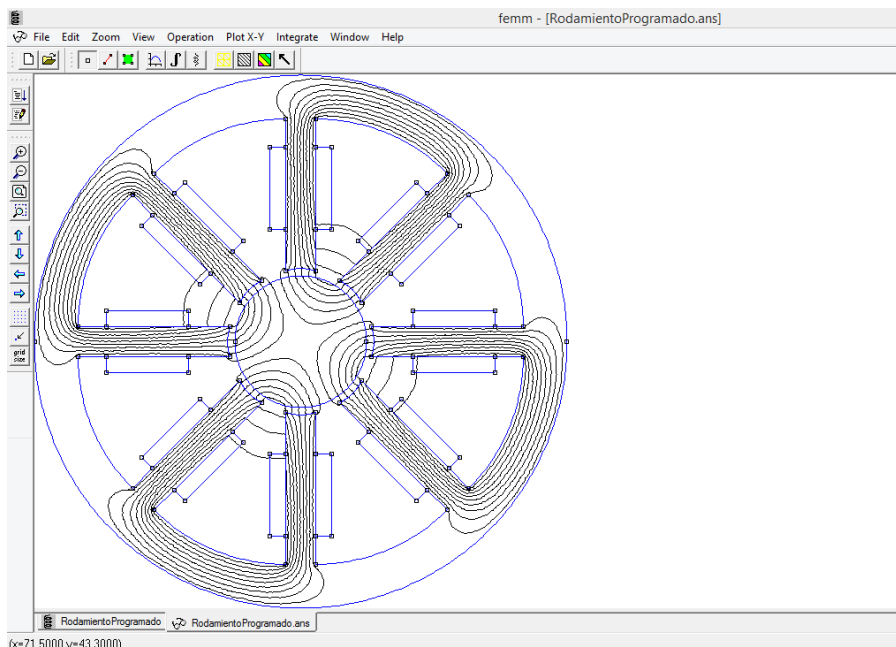


Figura 10 Resultado de una simulación en FEMM

Utilizando las diferentes posibilidades que nos ofrece el gran numero de variables, podemos conseguir de una forma muy sencilla, diferentes rodamientos con distintas especificaciones técnicas.

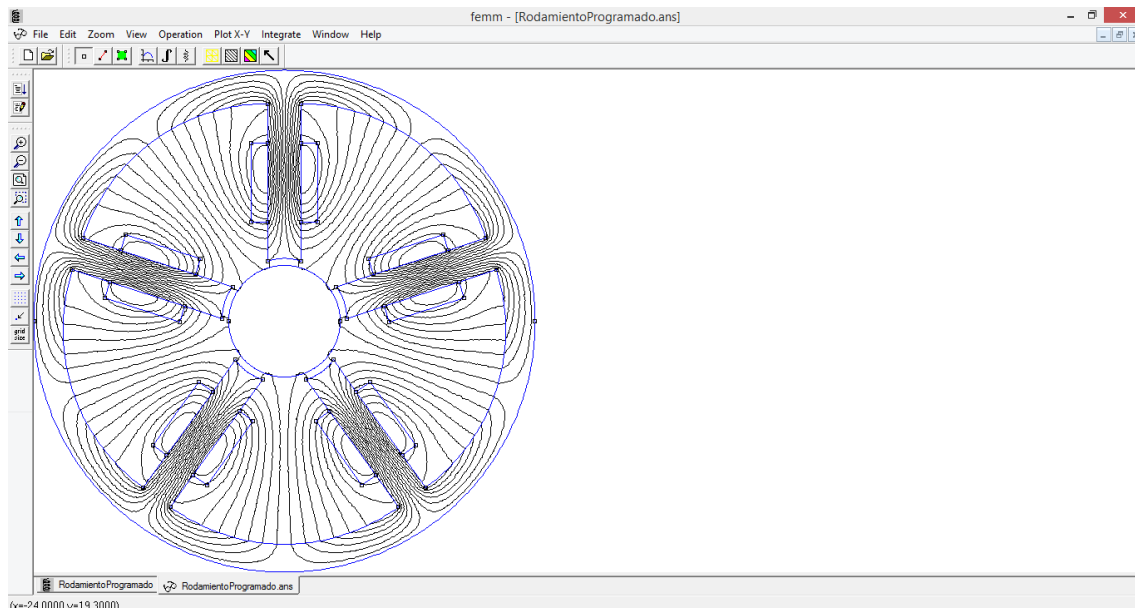


Figura 11 Resultado de una simulación en FEMM

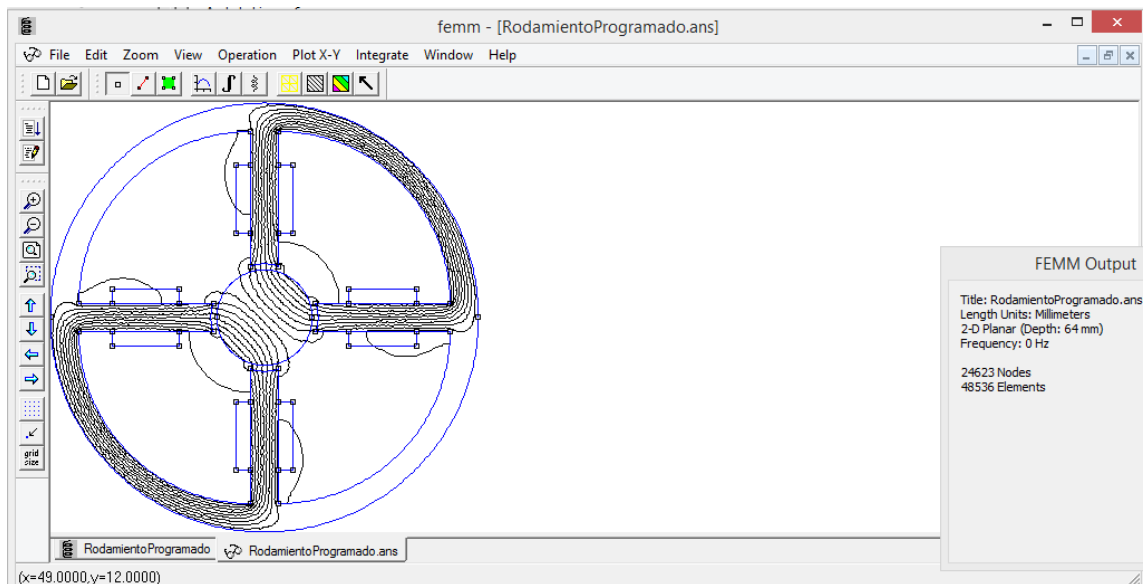


Figura 12 Resultado de una simulación en FEMM

Tal y como se ha comentado anteriormente, este script permite diseñar y analizar un rodamiento magnético activo utilizando *FEMM*.

Así, dicho script nos elabora una serie de datos y herramientas que facilitan el análisis del rodamiento, como son:

- **Guarda el diseño del rodamiento magnético en un fichero de FEMM:** Dentro del script hay un comando que es capaz de guardar un fichero en *FEMM* del diseño del rodamiento magnético con flujo axial (RodamientoMagnetico.FEM) ejecutado mediante Octave.
- **Disponibilidad de utilizar los cálculos de post-procesado que permite FEMM, como fuerzas, magnitud de campo magnético, gráficas etc.** Una vez hemos

concluido el script principal, el interfaz de post-procesado de FEMM permite calcular una serie de datos y obtener diferentes graficas sobre el rodamiento que hemos simulado.

4.2.2 SCRIPT DE POSTPROCESADO PARA CAMBIOS DE POSICION DEL ROTOR

Este script está diseñado para ser ejecutado después del script principal, y permite obtener automáticamente los cálculos de fuerzas ejercidas sobre el rotor en función de una serie de variaciones de posición del mismo. Para que este script se ejecute correctamente deberemos previamente configurar una serie de variables dentro del mismo comando “Cargar_Variables_Rodamiento”. Las Variables a configurar son:

Variable	Descripción
Variable.traslacionx	Desplazamiento en mm del rotor en el eje x
Variable.traslaciony	Desplazamiento en mm del rotor en el eje y
Variable.Nomedidas	Numero de translaciones del rotor que realiza el script con sus consiguientes medidas de fuerza.

Tabla 11 Variables para definir script de post-procesado

En este caso, el proceso que seguirá el script será, en primer lugar seleccionar el rotor anteriormente ya dibujado, trasladarlo en el eje x e y tanto como marque la variable de translación, analizar y mostrar los resultados. Después de esto el script realizara dos comandos de post-procesado:

- `mo_blockintegral(18);` realiza una integral de volumen sobre la superficie del rotor para calcular la fuerza ejercida en el eje x sobre el mismo.
- `mo_blockintegral(19);` realiza una integral de volumen sobre la superficie del rotor para calcular la fuerza ejercida en el eje y sobre el mismo.

Los datos obtenidos por estos comandos, son almacenados a su vez en otras 2 variables:

Variable	Descripción
Variable.fx	Fuerza sobre el rotor en el eje x
Variable.fy	Fuerza sobre el rotor en el eje y

Tabla 12 Variables que registran la fuerza en ambos ejes

Además, el script crea otras 2 variables destinadas a saber cuánto se ha desplazado el rotor respecto a su posición de origen:

Variable	Descripción
Variable.movientoenx	Desplazamiento del rotor en el eje x
Variable.movimientoeny	Desplazamiento del rotor en el eje y

Tabla 13 Variables que registran el desplazamiento del rotor en ambos ejes

Octave muestra en estas cuatro variables los resultados obtenidos de la simulación. Pero el script también hace que Octave obtenga una gráfica 3D en la que se observan estos resultados. La figura siguiente es un ejemplo de esta grafica, en los ejes x e y se muestra el desplazamiento del rotor, y en el eje z la fuerza total ejercida por las bobinas sobre el mismo.

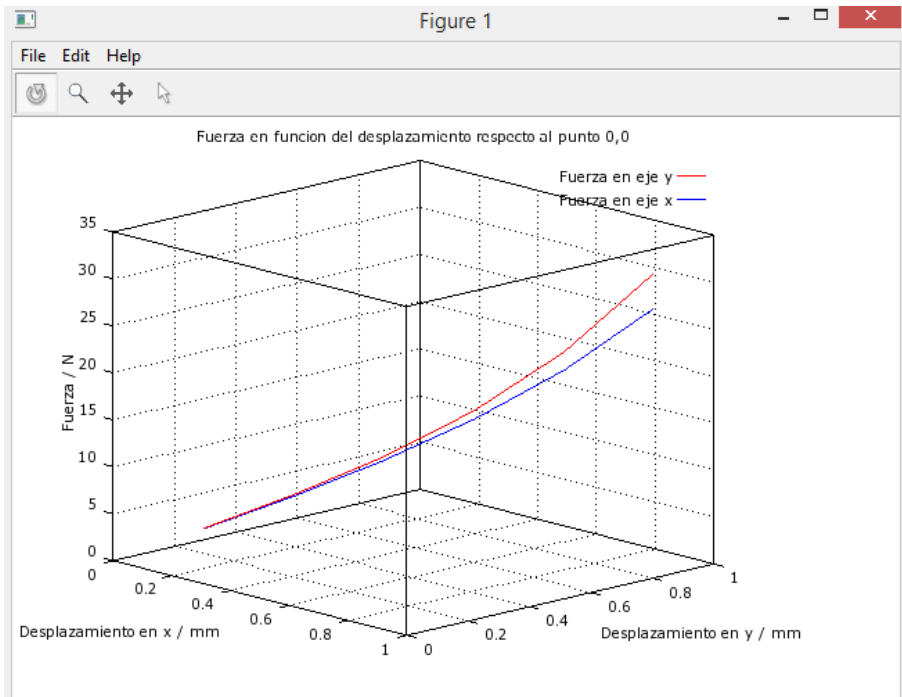
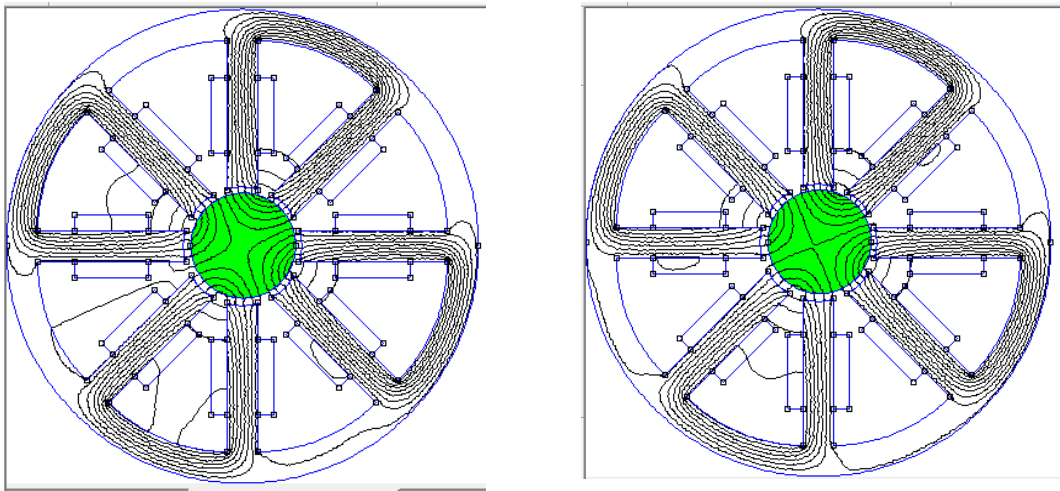


Figura 13 Gráfica 3D que muestra la Fuerza en ambos ejes en relación al desplazamiento del rotor, para una corriente de 2A



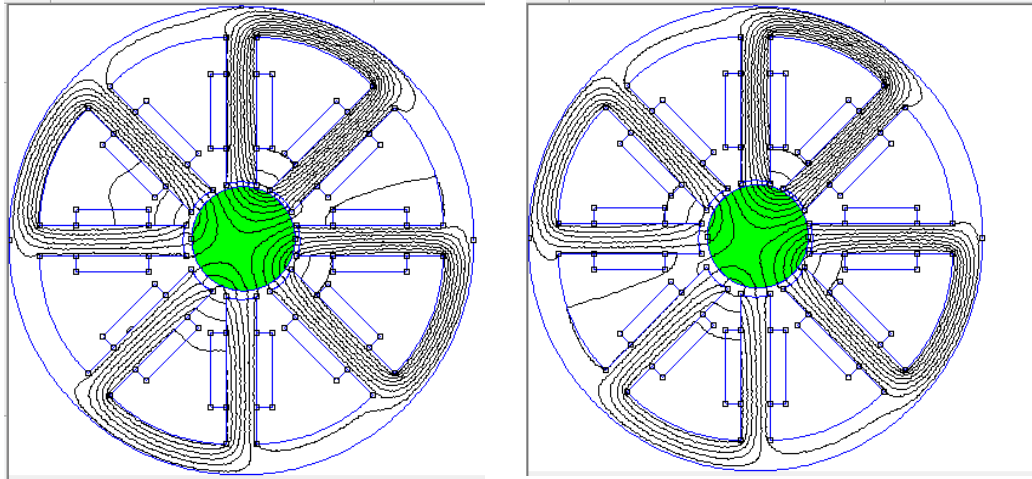


Figura 14 Resultados del post-procesado de cambios de posición, para desplazamientos en el eje x e y positivos

En este conjunto de imágenes muestra el desplazamiento del rotor en los ejes x e y, y como afecta a las líneas de campo generadas por las bobinas, y por consiguiente a la fuerza que se ejerce en el rotor en ambos ejes.

5. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA FUERZA SOBRE EL ROTOR EN FUNCIÓN DE VARIACIONES DIFERENCIALES DE CORRIENTE EN DOS GRUPOS DE BOBINAS EN HERRADURA.

A continuación, se describe un estudio realizado sobre la base de todo lo expuesto anteriormente, en que se calculan las fuerzas que se ejercen en el rotor del rodamiento electromagnético estudiado, cuando lo sometemos a la variación de los campos magnéticos de las bobinas por cambios en la intensidad que circula por ellas.

Para esto, la simulación tratará de variar la Variable.Corriente, permaneciendo las demás variables y geometrías sin ningún tipo de cambio.

El esquema inicial de la simulación será el siguiente:

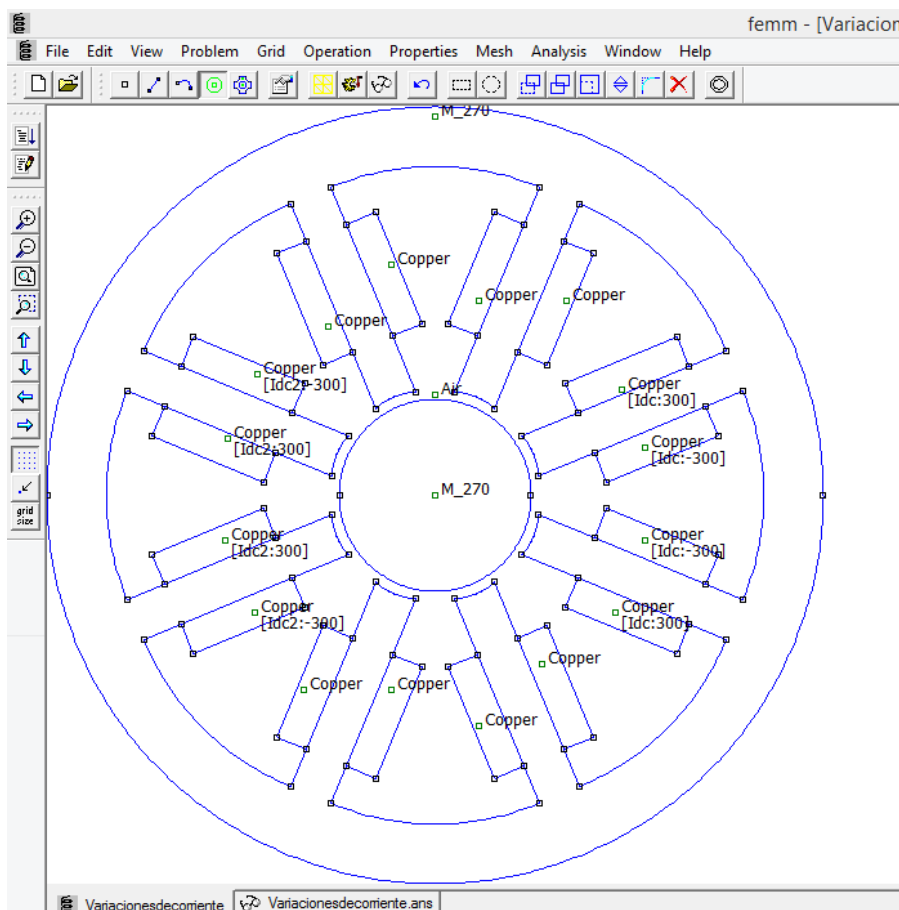


Figura 15 Configuración del rodamiento para la simulación de variaciones de corriente

Se estudiará el caso de un rodamiento de 8 polos (4 herraduras), en el cual se han desactivado dos herraduras y permanecen activas otras dos. Hemos elegido esta configuración de rodamiento ya que disponíamos de datos experimentales de un cojinete de estas características que ha sido construido en laboratorio. Las dos herraduras activas comparten todas las especificaciones técnicas excepto la corriente que atraviesa sus bobinas.

La simulación consistirá en realizar una variación diferencial de la corriente a través de las 2 herraduras, con el fin de mostrar cómo afecta esto a la fuerza que ejercen las mismas sobre el rotor del rodamiento. Para ello, estas serán las variables que deberá programar el usuario antes de comenzar la simulación:

Variable	Descripción
Variable.Corriente	Corriente por las bobinas de la herradura de la derecha
Variable.Corriente2	Corriente por las bobinas de la herradura de la izquierda
Variable.Diferenciali	Variación diferencial que se aplica a la corriente de las bobinas.
Variable.Nomedidas	Numero de variaciones y medidas que se realizan en la simulación.

Tabla 14 Variables a definir para la simulación

Además de estas variables, el usuario también podrá programar todas aquellas que aparecen en el comando “Cargar_Variables_Rodamiento” y que afectan a la geometría, materiales y demás condiciones técnicas, siempre y cuando no se modifiquen las que afectan al número de polos o la configuración de las bobinas.

Una vez todos los parámetros han sido programados, puede comenzar la simulación. Los resultados de la misma, quedaran registrados en la variables f_x y f_y que ya hemos definido anteriormente, en cualquier caso en esta simulación lo que nos importa es la fuerza en el eje x por lo tanto el script mostrara una gráfica con f_x y la variación de corriente.

En este caso se muestran los resultados de una simulación en la que partimos de la configuración inicial mostrada anteriormente, el rotor se encuentra en la posición central (0,0) y se aplican inicialmente 2 Amperios a las herraduras a la izquierda y derecha del rotor, y una variación diferencial de 0.2 Amperios entre ellas.

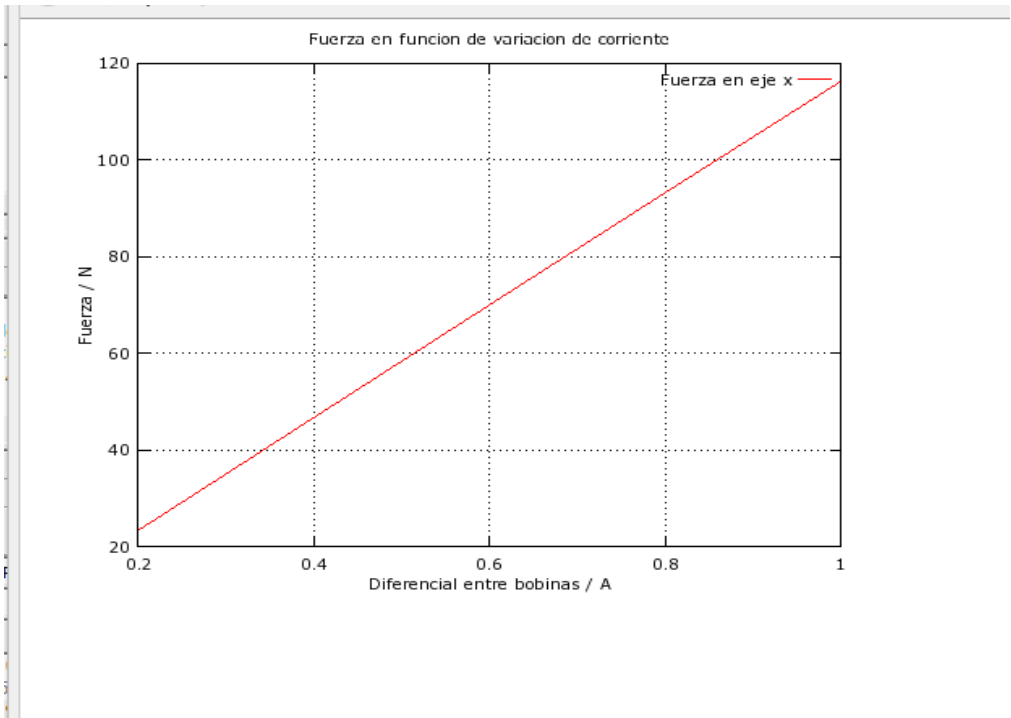
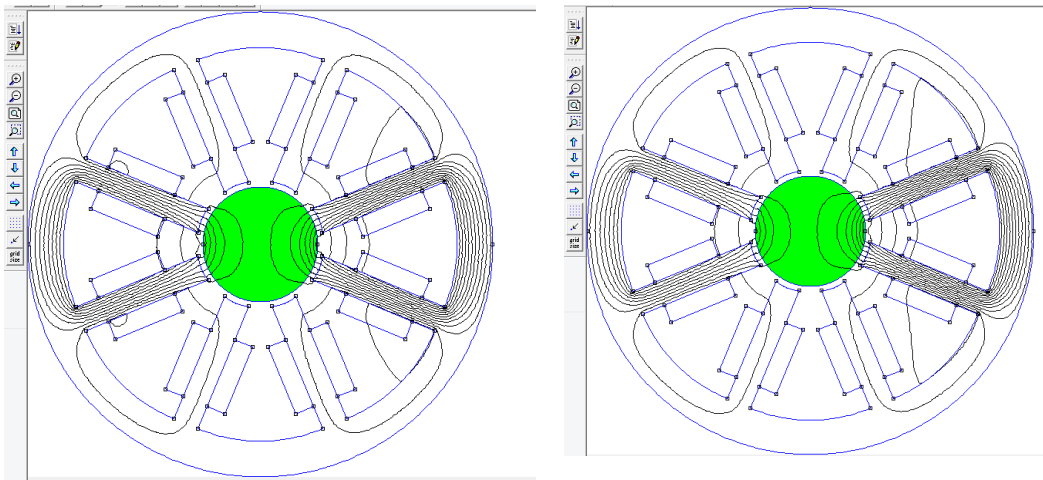


Figura 16 Gráfica de la fuerza sobre el rotor por las variaciones de corriente



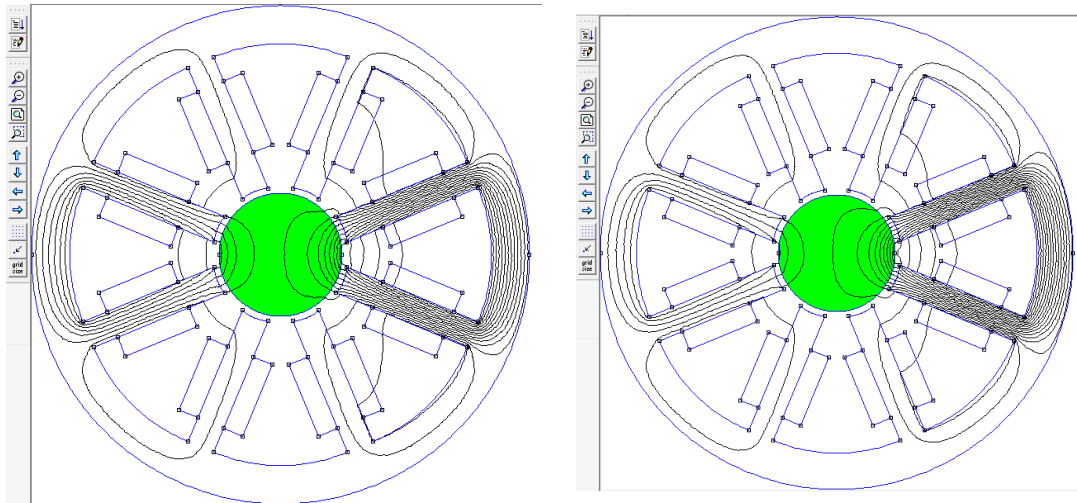


Figura 17 Resultados de la simulación en el post-procesado de FEMM

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de la simulación que estamos comentando.

Diferencial de Corriente (A)	Fuerza en x (N)
0,2	23.396
0,4	46.762
0,6	70.083
0,8	93.319
1	116.377

Tabla 15 Resultados numéricos obtenidos de la simulación

A la vista de los resultados podemos observar, como es obvio que la fuerza resultante aumenta a medida que aumenta la diferencia de corriente entre las dos bobinas, siendo siempre de atracción a la herradura por la que circula mayor corriente. Esta simulación permitiría calcular los requerimientos de corriente para el control del rodamiento para compensar fuerzas externas sobre el rotor.

Si quisiéramos realizar la misma simulación, pero para el caso de que la herradura de la izquierda sea la que posee una mayor corriente, deberíamos programar la Variable.diferenciali con un valor negativo, de esta forma la corriente aumentara en las bobinas de la izquierda y se reducirá en la misma medida en la misma medida en las bobinas de la derecha.

6. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA FUERZA SOBRE EL ROTOR CUANDO SE DESPLAZA HACIA 2 BOBINAS EN HERRADURA.

El siguiente estudio consistirá en observar cómo afectan pequeñas variaciones de posición del rotor, a la fuerza que ejerce una bobina sobre el mismo.

En esta simulación, el único parámetro que variamos es el Gap, permaneciendo todas las demás variables sin alterar. Para variar el Gap utilizaremos una variable que ya habíamos visto antes en el script de post-procesado, además también podremos modificar la variable que nos indica el número de mediciones para obtener más o menos resultados:

Variable	Descripción
Variable.traslacionx	Desplazamiento en mm del rotor en el eje x
Variable.Nomedidas	Numero de variaciones y medidas que se realizan en la simulación

Tabla 16 Variables a definir para simulación de cambios de posición del rotor

Con esta variable podremos alejar o acercar el rotor a la herradura tanto como el usuario elija, variando de este modo el Gap. El script de la simulación será capaz de calcular la nueva fuerza ejercida por las bobinas sobre el rotor y de mostrarla. El resto de variables también podrán ser manipuladas por el usuario para obtener el rodamiento deseado, aunque será necesario que la variable que define el número de polos marque 8 para obtener el diseño deseado.

El esquema inicial de la simulación será el siguiente:

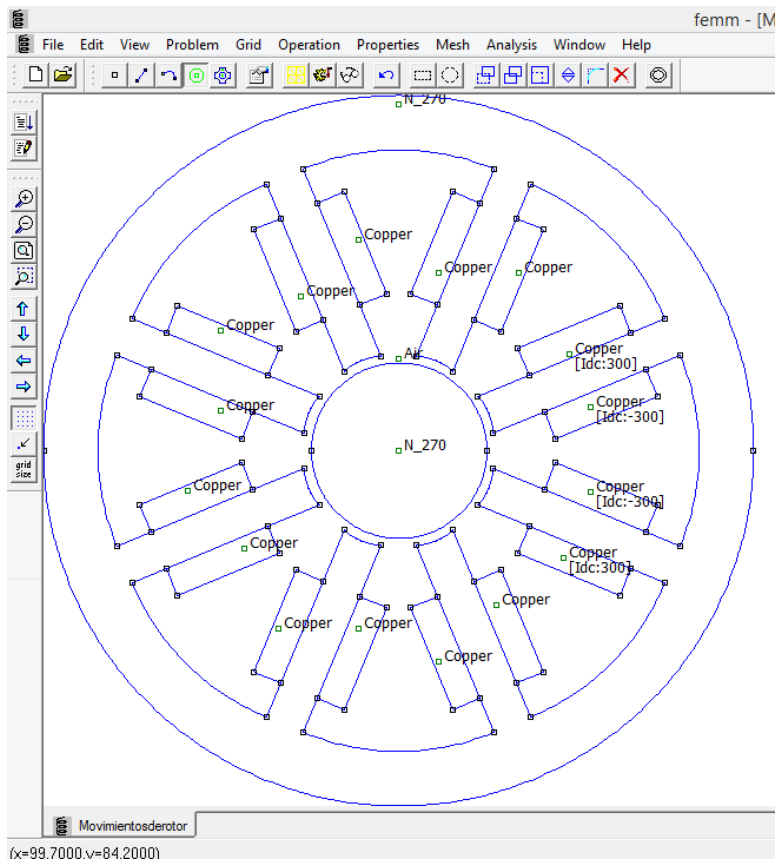


Tabla 17 Configuración del rodamiento para simulación de movimiento del rotor

Se estudiara pues de nuevo un rodamiento de 8 polos en herradura, en el que se han desactivado todas las bobinas excepto dos que están configuradas en herradura. Tanto la corriente como el número de espiras de las bobinas pueden ser configurados por el usuario. En este caso, programamos las bobinas con 300 espiras y una corriente de 1.33 Amperios a través de ellas.

Una vez hemos programado todas las variables, puede dar comienzo la simulación. Los resultados quedarán de nuevo registrados en la Variable.fx, lo que permitirá su posterior visualización como tabla de datos y como grafica.

La figura18 es un ejemplo del tipo de grafica que obtenemos después de la simulación:

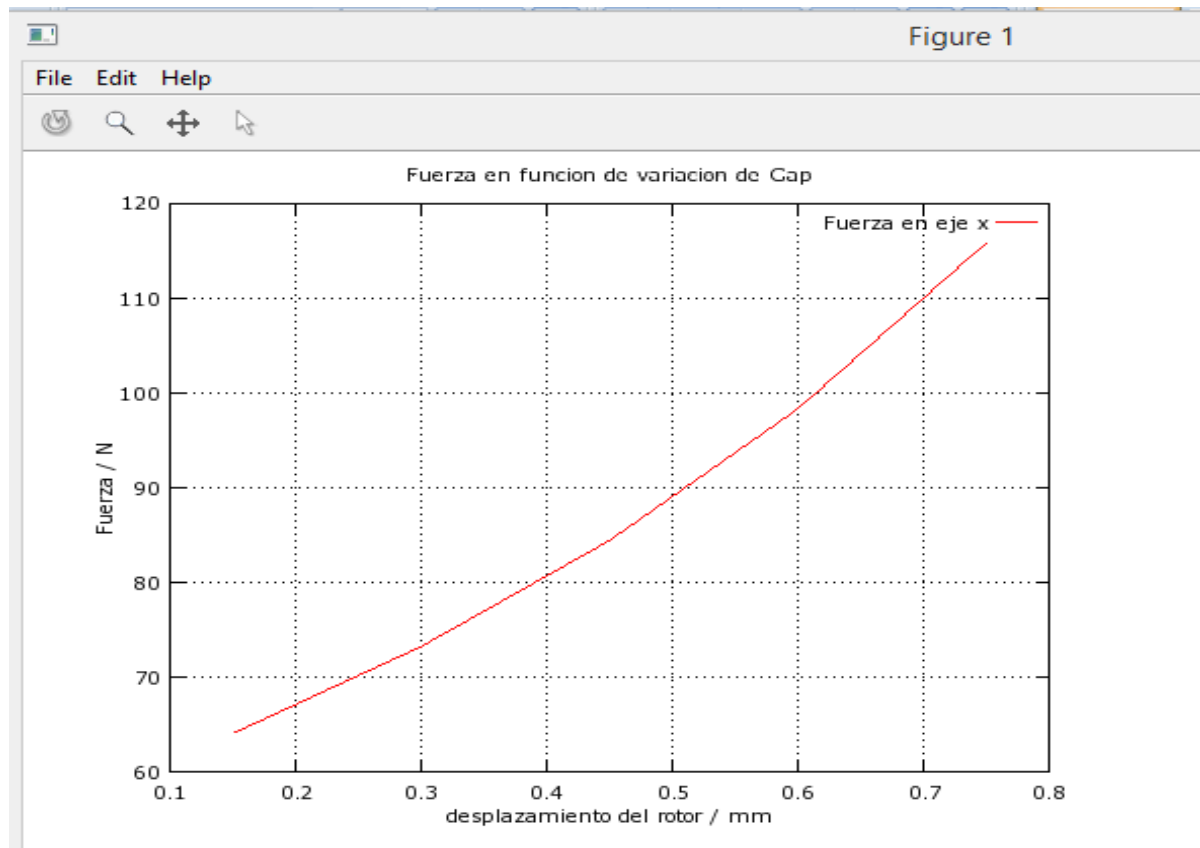


Figura 18 Gráfica de la fuerza ejercida sobre el rotor por las variaciones de posición para una corriente de 1.33 A

En la figura 19 se muestran los resultados que va obteniendo el post-procesador de FEMM a medida que se desplaza el rotor.

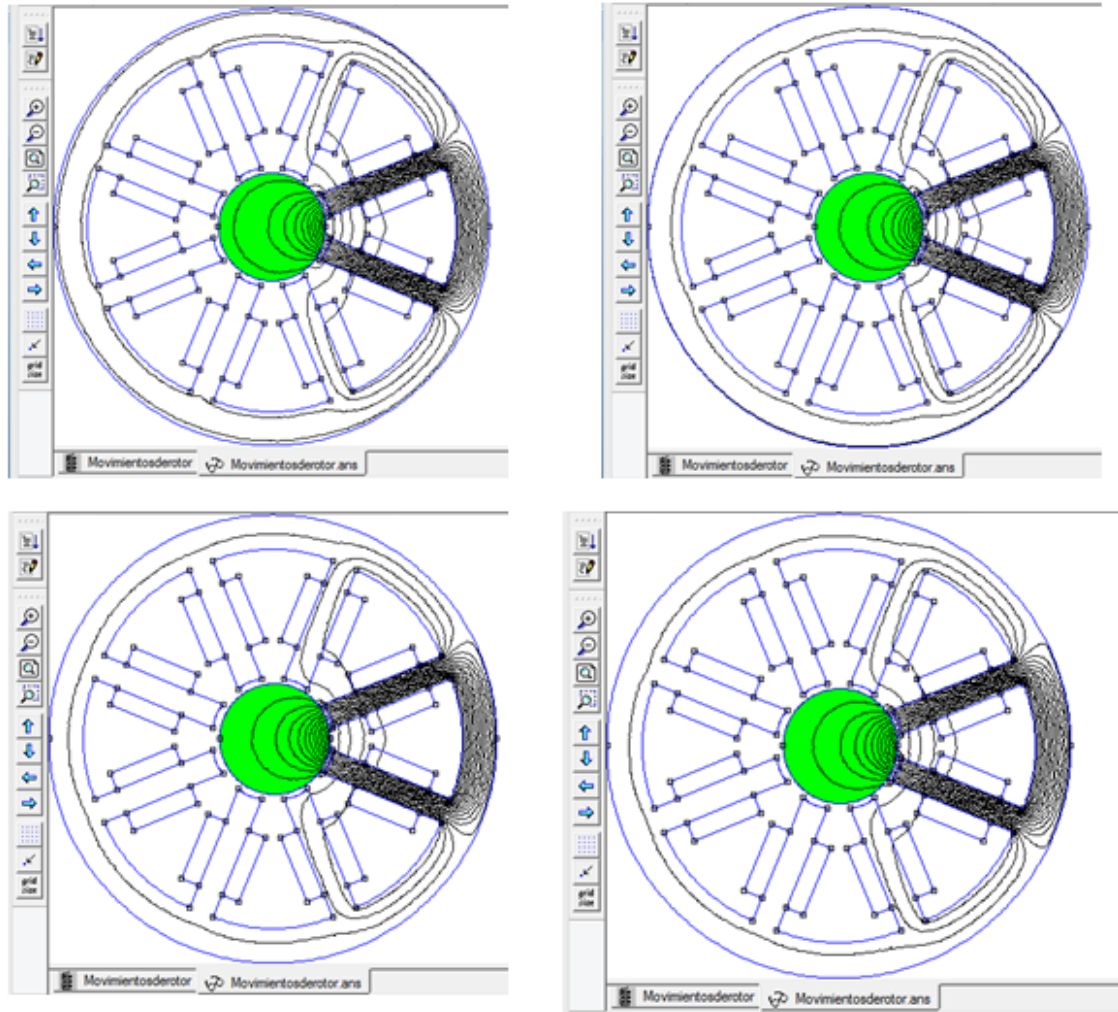


Figura 19 Resultados de simulación de movimiento del rotor en post-procesado de FEMM.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de la simulación que estamos comentando.

Desplazamiento rotor (mm)	Fuerza en x (N)
0.15	64.121
0,3	73.301
0,45	84.506
0,6	98.40
0.75	115.94

Tabla 18 Resultados numéricos de la simulación de movimiento del rotor.

A la vista de los resultados parece claro que reducir el Gap, provoca que la fuerza que ejercen las bobinas sobre el rotor aumente proporcionalmente. Los datos obtenidos con esta simulación permitirían calcular la corriente necesaria por las bobinas para ejercer un control sobre el rodamiento, y corregir los desplazamientos que pudieran producirse.

7. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE DISEÑO.

7.1 DISEÑO DE UN RODAMIENTO CON UN REQUERIMIENTO ESPECÍFICO DE FUERZA NOMINAL

Una de las aplicaciones de la herramienta de diseño que hemos desarrollado en este proyecto, podría ser la de crear un rodamiento del que necesitamos una fuerza nominal específica. Se entiende como fuerza nominal aquella que es capaz de ejercer una bobina (o grupo de bobinas) sobre el rotor en las condiciones de máxima corriente circulando a través de las mismas y en la posición de equilibrio.

Para esta demostración, utilizaremos como referencia los datos obtenidos en un rodamiento experimental, los mismos datos que hemos utilizado para la validación de nuestro modelo. En este rodamiento, la fuerza nominal se ejerce cuando por las bobinas circulan 4 Amperios, y tiene un valor de 279 Newton. Los datos de geometría de este rodamiento son los siguientes:

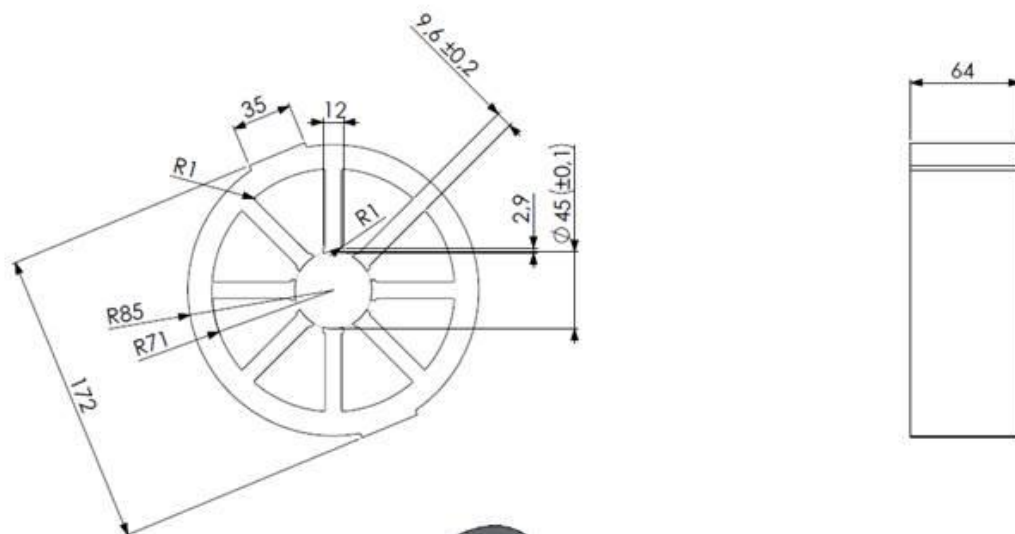


Figura 20 Esquema acotado de rodamiento de 8 polos experimental.

Los materiales y demás especificaciones técnicas del rodamiento son las mismas que hemos utilizado en la validación del modelo.

Para esta simulación intentaremos conseguir otros dos rodamientos, con dimensiones un 25% y un 50% más pequeñas y con la misma fuerza nominal, variando únicamente el Gap, es decir el espacio entre el rotor y los polos del estator. En el modelo experimental presenta un Gap de 1.5 mm, a través de esta simulación podremos comprobar en qué porcentaje hay que reducir ese Gap cuando reducimos las dimensiones del rodamiento para conseguir la misma fuerza nominal sobre el rotor.

En primer lugar intentaremos encontrar un diseño valido reduciendo las dimensiones globales del rodamiento un 25%. Introduciremos pues las siguientes variables geométricas:

Variables	Valor(mm)	Descripción
Variable.Radiorotor	15.75	Define el radio del rotor interior
Variable. Radioexterior	63.75	Define el radio de la circunferencia exterior del estator
Variable.Anchopolo	7.2	Define la anchura de los polos
Variable.Anchobobina	7.5	Define la anchura de las bobinas acopladas a los polos
Variable.Anchoexterior	10.5	Define la anchura del estator
Variable.Depth	48	Define la profundidad en el eje z del diseño

Tabla 19 Variables de diseño para simulación cambio de dimensiones.

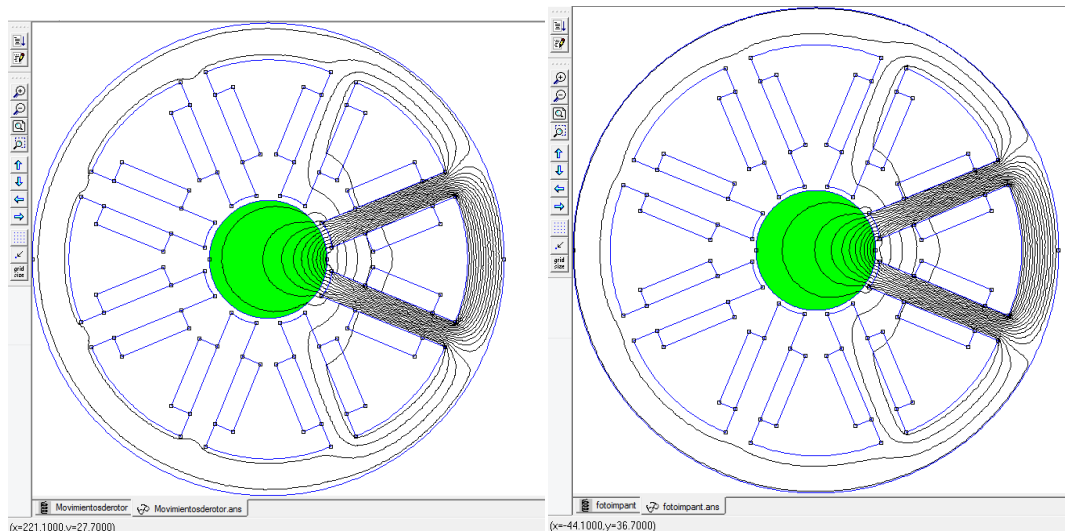


Figura 21 Izq- Rodamiento con dimensiones originales, Drcha- Rodamiento con reducción del 25% y nuevo Gap

En un principio situaremos el Gap en 1.5 mm, igual que el original, y a través de una pequeña modificación en el script de post-procesado que hemos desarrollado anteriormente, iremos reduciendo el Gap y visualizando como afecta esto a la fuerza que ejerce sobre el rotor.

Los resultados obtenidos iterando con el Gap son los siguientes:

Gap (mm)	Fuerza nominal (N)
1,5	162,06
1,2	199,5
0,7	296,34
0,85	261,47
0,79	275,15

0,78

279,52

Tabla 20 Resultados de los cálculos de nuevo Gap

Gracias a nuestro script hemos podido obtener un nuevo diseño de un rodamiento electromagnético un 25% más pequeño y con la misma fuerza nominal. La única variación que se ha producido es reducir el Gap un 48% hasta los 0.78 mm.

A continuación realizaremos el mismo estudio pero reduciendo el rodamiento hasta un 50% más pequeño. Las nuevas dimensiones a programar son las siguientes:

Variables	Valor(mm)	Descripción
Variable.Radiorotor	10.5	Define el radio del rotor interior
Variable. Radioexterior	42	Define el radio de la circunferencia exterior del estator
Variable.Anchopolo	4.8	Define la anchura de los polos
Variable.Anchobobina	5	Define la anchura de las bobinas acopladas a los polos
Variable.Anchoexterior	7	Define la anchura del estator
Variable.Depth	32	Define la profundidad en el eje z del diseño

Tabla 21 Variables para reducción del 50% en las dimensiones geométricas.

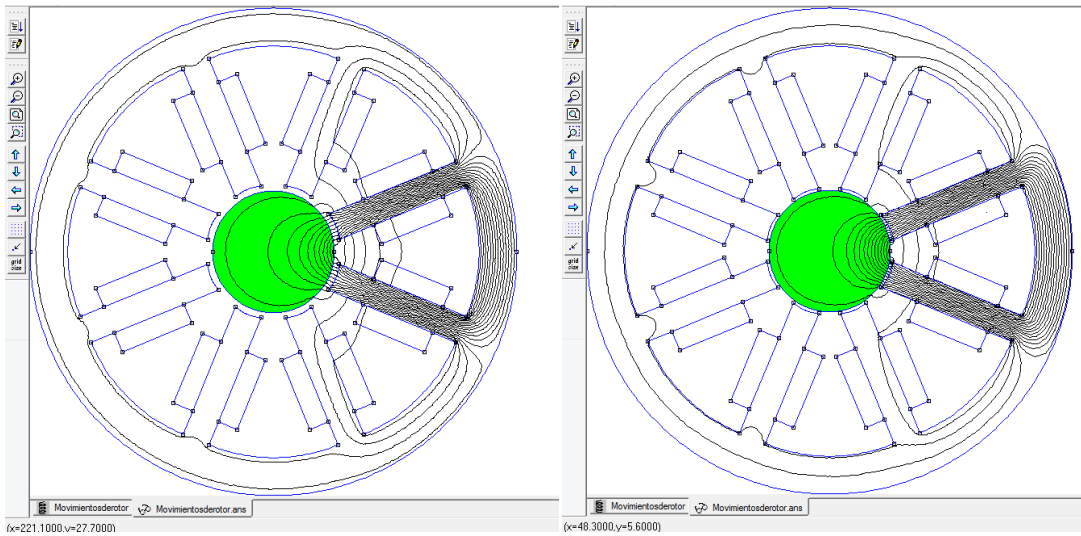


Figura 22 Izq- Rodamiento con dimensiones originales, Drcha- Rodamiento con reducción del 50% y nuevo Gap

De nuevo en un principio situaremos el Gap en 1.5 mm, igual que el original, e iremos reduciendo el Gap y visualizando como afecta esto a la fuerza que ejerce sobre el rotor.

Gap (mm)	Fuerza nominal (N)
1,5	69,36
1	104,77
0,5	173,9
0,1	296,73
0,15	274,63
0,14	280,28

Tabla 22 Resultados de cálculos del Gap para reducción del 50%

Gracias a nuestro script hemos podido obtener un nuevo diseño de un rodamiento electromagnético un 50% más pequeño y con la misma fuerza nominal. La única variación que se ha producido es reducir el Gap un 90.67% hasta los 0.14 mm.

En este caso hemos utilizado variaciones de Gap para conseguir la fuerza nominal necesaria, pero estos cálculos podrían realizarse también utilizando otro parámetro como variable para conseguir los requerimientos de fuerza necesarios, como podría ser el número de espiras en las bobinas, las dimensiones de los polos, o los materiales utilizados.

7. CONCLUSION.

En primer lugar, en este PFC se desarrolla una herramienta de diseño para rodamientos electromagnéticos de n polos mediante scripts en Octave, que se resuelven mediante el método de elementos finitos con FEMM. Se ha validado el modelo con los datos experimentales de un rodamiento de laboratorio de 8 polos descrito en la memoria.

Los datos calculados son los coeficientes rigidez estática, campo magnético en el Gap, fuerza ejercida sobre el rotor y tamaño del mallado del modelo para validar el modelo simulado.

Se ha diseñado un script principal que permite el diseño de un rodamiento electromagnético de n polos con geometría variable. El script principal se compone de otros script que actúan como subrutinas con diferentes cometidos. Además también se ha programado otro script que permite cálculos de post-procesado para fuerzas sobre el rotor provocadas por desplazamientos del mismo dentro del Gap. También se han programado dos simulaciones que permiten el estudio del comportamiento de un rodamiento de 8 polos en herradura cuando se aplican variaciones de corriente en grupos de bobinas, y desplazamientos del rotor hacia una herradura.

Por último, se han demostrado una de las aplicaciones que podría tener la herramienta de diseño, para ello hemos conseguido, partiendo de los datos de un rodamiento experimental, desarrollar otro rodamiento simulado con dimensiones reducidas y que es capaz de desarrollar la misma fuerza nominal, variando únicamente el Gap.

Como trabajo futuro, quedan pendientes las siguientes tareas de investigación:

Diseño de un bucle de control con la consigna de corriente adecuada para el control de la estabilidad del rotor en el rodamiento magnético simulado en este PFC.

Desarrollar la herramienta de diseño para que permita modelar otro tipo de rodamientos mediante variables de configuración.

Programar nuevos scripts que permitan otros cálculos de post-procesado para cualquier rodamiento radial de n polos, como variaciones de corriente por las bobinas o conexión o desconexión de alguna de ellas.

Comprobar experimentalmente si los datos obtenidos en los estudios de los apartados 5 y 6 de en este PFC para el rodamiento de 8 polos en herradura se ajustan a los obtenidos en el cojinete construido.

8. BIBLIOGRAFIA.

- [1] José María Pamplona “Herramienta para el diseño de rodamientos magnéticos axiales” Trabajo Fin de Máster. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza. Mayo 2013. <http://zaguan.unizar.es>

- [2] Koichi Matsuda, Yoichi Kanemitsu, and Shinya Kijimoto. “Optimal Number of Stator Poles for Compact Active Radial Magnetic Bearings”. Department of Intelligent Machinery & Systems, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan. Agosto 2007 Puede consultarse aquí: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.ieee-art-000004277907>

- [3] Rigoberto Vásquez Díaz “Control Tolerante a Fallas Pasivo en un Rodamiento Magnético.” Ing. Electrónico por el Instituto Tecnológico de Cuautla. Febrero del 2012. Puede consultarse aquí: www.cenidet.edu.mx/subaca/web-elec/tesis_mc/266MC_rvd.pdf

- [4] Han Bangcheng, Zheng Shiqiang, Wang Xi, and Yuan Qian, ” Integral Design and Analysis of Passive Magnetic Bearing and Active Radial Magnetic Bearing for Agile Satellite Application”, Publicado en IEEE Transactions on Magnetics, volumen 48. Junio 2012.
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6111297&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6111297

- [5] José Danilo Rairán Antolines, Julio Cesar Moreno Cañón “Diseño del circuito magnético de un rodamiento magnético por medio de elementos finitos”. Tecnura, vol. 11, núm. 22, 2008,pp. 63-72.Universidad Distrital Francisco José de Caldas Bogotá (Colombia). <http://tecnura.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/246>

- [6] Hernán Alberto Rojas Chitiva, “Diseño e Implementación de un sistema de Rodamiento Magnetico como Prototipo de Laboratorio”. Facultad Tecnológica - Seminario de Investigación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2008. Puede consultarse en http://rodamiento-esv.wikispaces.com/file/view/Documento_IEEE.pdf.

- [7] G. Schweitzer and E. H. Maslen “Magnetic bearings. Theory, design and application to rotating machinery”, Ed. Springer, 2009.

- [8] David Meeker “FEMM 4.2 Electrostatics Tutorial1”. January 25, 2006.

- [9] David Meeker “FEMM 4.2 Magnetostatics Tutorial1”. January 25, 2006.

- [10] José María Valiente Cifuentes “Manual de iniciación a GNU Octave”. Trabajo realizado dentro de un Proyecto Fin de Carrera dirigido por Carlos Medrano Sánchez en la E.U. Politécnica de Teruel Año 2006.
http://softlibre.unizar.es/manuales/aplicaciones/octave/manual_octave.pdf

[11] David Meeker. Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM Version 1.2 User's Manual October 16, 2010. http://docsfiles.com/pdf_octave_manual_gnu.html

[12] Manual Básico de Octave y Qt octave. Métodos Matemáticos para las Ciencias de la Salud. Curso 2010/11. Macarena Gómez Mármol, Manuel Luna Laynez y María de los Ángeles Rodríguez Bellido. Puede encontrarse en:
<http://es.scribd.com/doc/102089041/Manual-Octave-2#scribd>

9. ANEXOS

9.1 INTERFAZ GRAFICO PARA OCTAVE.

Octave o GNU Octave es un programa libre para realizar cálculos numéricos. Como indica su nombre es parte del proyecto GNU. Apoyado en una amplia comunidad de desarrolladores y usuarios, Octave cuenta con herramientas para la resolución de problemas de cálculo numérico lineal y no lineal: álgebra lineal, aproximación de raíces de ecuaciones, integración numérica, integración de ecuaciones diferenciales, etc., así como para la representación de gráficos en dos y tres dimensiones. Es fácilmente extensible y adaptable mediante funciones definidas por el usuario, bien utilizando el propio lenguaje de Octave o bien mediante módulos escritos en C++, C, Fortran u otros lenguajes.

El proyecto fue creado alrededor del año 1988 pero con la finalidad de ser utilizado en un curso de diseño de reactores químicos. Posteriormente en el año 1992 se decide extenderlo y comienza su desarrollo hasta nuestros días.

De entre las interfaces, nosotros utilizaremos QtOctave. Este programa está disponibles para distintos sistemas operativos, cuenta con numerosos menús, botones y ventanas de diálogo que, aun encontrándose todavía en fase experimental, podemos decir que se trata de una herramienta que facilita al usuario la comunicación con Octave.

En la siguiente figura representa el interfaz gráfico para el programa *Octave*:

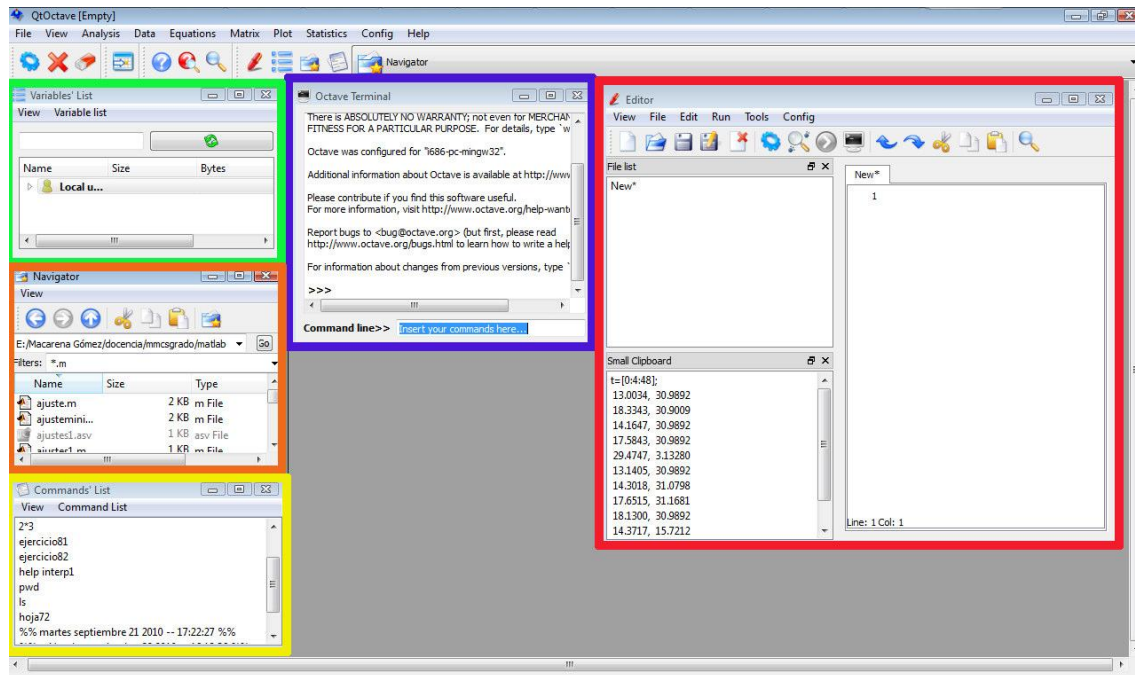


Figura 23 Interfaz de usuario de QtOctave2

En la parte izquierda de la pantalla aparecen tres ventanas también muy útiles: en la parte superior aparece la ventana (recuadrada en verde en la Figura 24) Variable Lists que contiene información sobre todas las variables que se hayan definido en esta sesión y permite ver y modificar las matrices y vectores con los que se esté trabajando. A continuación tenemos la pantalla Navigator (recuadrada en naranja en la Figura 24) donde se muestra los ficheros del directorio activo o actual. En la parte inferior aparece la ventana (recuadrada en amarillo en la Figura 24) Commands List que muestra los últimos comandos ejecutados en la Octave Terminal. Estos comandos se pueden volver a ejecutar haciendo doble clic sobre ellos.

Por último aparece una ventana (recuadrada en rojo en la Figura 24) que corresponde al Editor de texto para los programas.

Estas ventanas pueden ser colocadas en cualquier orden dentro del espacio de trabajo, pueden estar cerradas si no van a ser utilizadas, y pueden abrirse en cualquier momento.

En la figura anterior se tiene que introducir la ruta del directorio del programa de elementos finitos (*FEMM*) en parte recuadrada de color naranja para que *Octave* pueda comunicarse con la biblioteca que contiene *FEMM*. Es muy importante porque *FEMM* tiene una biblioteca muy amplia de diferentes materiales con sus características técnicas que posee cada tipo de material. Octave puede trabajar de dos maneras que son por línea de comando y por ficheros *.m.

Línea de comandos:

En *editor* (recuadro de color rojo de la Figura 28) se puede escribir directamente los cálculos que se quieren realizar. Un ejemplo de línea de comandos sería el siguiente:

```
octave:1>1+1
ans = 2
octave:2>
```

Ficheros *.m:

Las instrucciones se pueden proporcionar a través de ficheros. Estos ficheros tienen la extensión *.m y contienen conjuntos de comandos o definición de funciones. La importancia de estos ficheros es que al teclear su nombre en la línea de comandos y pulsar Intro, se ejecutan uno tras otro todos los comandos contenidos en dicho fichero. El poder guardar las instrucciones en un fichero permite ahorrar mucho tiempo y trabajo.

Aunque los ficheros *.m se pueden crear con cualquier editor de texto tal como *Bloc de Notas*, *Notepad++*, *Word*, etc, *Octave* dispone de un editor que permite crear y modificar estos ficheros, como ejecutarlos paso a paso para ver si contiene errores. Las líneas de comentario se indican con el carácter % delante del comentario. En nuestro caso para la realización de los diferentes scripts hemos utilizado el editor de texto *Notepad++* porque representa los diferentes comandos en distintos colores. Por lo tanto, en nuestro caso se ha utilizado ficheros *.m.

Otra manera de introducir en un fichero .m la ruta del directorio donde se encuentra la biblioteca de FEMM es introduciendo en el script el siguiente comando:

```
addpath("C:\\femm42\\mfiles")
```

9.2 PROGRAMACION EN OCTAVE

Bifurcaciones y bucles

Octave es una aplicación que se puede programar muy fácilmente. Las más básicas son las bifurcaciones y los bucles.

La Figura x muestra dos posibles formas de bifurcaciones.

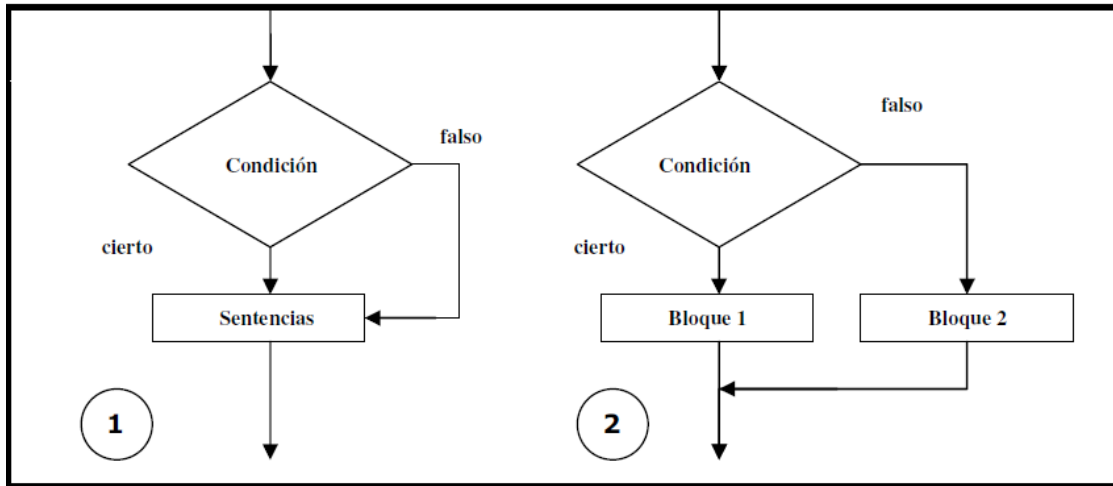


Figura 24 Bucle de programación en Octave

Los bucles permiten repetir las mismas o análogas operaciones sobre datos distintos. La figura 9 muestra dos posibles formas de bucle, con el control situado al principio o al final del mismo. Si el control está situado al comienzo del bucle es posible que las sentencias no se ejecuten ninguna vez, por no haberse cumplido la condición cuando se llega al bucle por primera vez. Sin embargo, si la condición está al final del bucle las sentencias se ejecutarán por lo menos una vez, aunque la condición no se cumpla.

Sentencia if

En su forma más simple, la sentencia if se escribe de la forma siguiente:

Caso 1
if condición
 sentencias
end

Caso 2
if condicion
 bloque 1
 else
 bloque 2
end

Existe también la bifurcación múltiple, en la que pueden concatenarse tantas condiciones como se desee, y que tiene la forma:

```

if condicion1
    bloque 1
elseif condicion2
    bloque 2
elseif condicion3
    bloque 3
else %opcion por defecto para cuando no se cumplan 1,2,3

```



```

bloque4
end

```

Donde la opción por defecto else puede ser omitida: si no está presente no se hace nada en caso de que no se cumpla ninguna de las condiciones que se han chequeado.

Sentencia for

La sentencia for repite un conjunto de sentencias un número predeterminados de veces. La siguiente construcción ejecuta sentencias con valores de i de 1 a n, variando de uno en uno.

```

for i=1:n
    sentencias
end

```

9.3 VISUALIZACION DEL SCRIPT PRINCIPAL DEL DISEÑO DEL RODAMIENTO.

En la Figura x representa uno de los dos script comentados en el trabajo que contienen una serie de funciones y comandos que vamos a comentar:

```

1  %-----$
2  %%% PROGRAMA PARA DIBUJAR UN RODAMIENTO DE DIMENSIONES VARIABLES Y N POLOS %%%
3  %-----$
4
5  % Añadimos a OCTAVE la ruta de los ficheros .m del FEMM
6  addpath("C:\\femm42\\mfiles") % Elimino en mi ordenador esta sentencia porque ya está dedinado este camino.
7
8  % Añado a Octave el path al directorio de trabajo
9  addpath("C:\\Users\\PABLO\\Desktop\\UNIVERSIDAD\\ALBERTO\\PFC\\programas octave")
10
11 % Cambio de directorio al directorio de trabajo (MODIFICAR SEGUN EL CASO)
12 cd("C:\\Users\\PABLO\\Desktop\\UNIVERSIDAD\\ALBERTO\\PFC\\modelos2Dfemm")
13
14 global Variable ;
15 Cargar_Variables_Rodamiento
16 Dibujar_geometrias_rodamiento
17 Cargar_materiales_y_condiciones_de_contorno
18 Materiales_y_condiciones_herradura
19
20 if (Variable.Configuracion == 0)
21     printf("Configuración polos independientes seleccionada...\n");
22
23     %%% Inicio la tarea de mi EXERCISE
24     printf("Abriendo FEMM (Iniciando conexión de Octave a FEMM...\n");
25     openfemm % Abrimos el FEMM
26
27     printf("Creando documento de FEMM para simulación magnética...\n");
28     newdocument(); % Creamos nuevo documento de femm magnético
29
30     printf("Especificando características del problema...\n");
31
32     mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, Variable.Depth, 30); % Especificamos las características del problema en femm
33
34
35 % Dibujamos el rodamiento magnético
36 printf("Dibujando geometrias del rodamiento...\n");
37 Dibujarrodamiento(); % Dibuja el cojinete magnético
38

```

9.4 DESCRIPCION DE COMANDOS PARA INTERAPTUAR OCTAVE CON FEMM EN EL SCRIPT PRINCIPAL.

Para comunicarse con el programa de elementos finitos *FEMM v4.2* se realiza mediante una serie de comandos que se han resumido en la siguiente tabla:

COMANDO	DESCRIPCIÓN
openfemm	Se abre FEMM
newdocument(0)	Creamos nuevo documento en FEMM
mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, 0, 30)	Especificaciones en FEMM sobre el tipo de simulación que queremos obtener. En nuestro caso Frecuencia = 0 Hz (trabajamos con corriente DC); Unidades = milímetros; Simetría= planar ; El resto de valores por defecto
Dibujar()	Es una función creada anteriormente en un subprograma y se llama para que dibuje el cojinete magnético
Materiales()	Es una función creada anteriormente en un subprograma. EL objetivo de esta función es la aplicación de los materiales a cada parte del rodamiento, características técnicas y condición de contorno introducidas por el usuario
mi_zoom(*,*,*,*)	Se hace un zoom del rodamiento magnético en FEMM
mi_saveas('*.FEM');	Se guarda el archivo con el nombre que deseemos sin espacios y con extensión .FEM

Tabla 23 Comandos del script principal

9.5 SCRIPTS DE DISEÑO Y POSTPROCESADO.

9.5.1 SCRIPT PRINCIPAL

```
%-----%
%% PROGRAMA PARA DIBUJAR UN RODAMIENTO DE DIMENSIONES VARIABLES Y N POLOS %%%
%-----%
% Añadimos a OCTAVE la ruta de los ficheros .m del FEMM
addpath("C:\\femm42\\mfiles")
% Añado a Octave el path al directorio de trabajo
addpath("C:\\Users\\PABLO\\Desktop\\UNIVERSIDAD\\ALBERTO\\PFC\\programas octave")
% Cambio de directorio al directorio de trabajo (MODIFICAR SEGUN EL CASO)
cd("C:\\Users\\PABLO\\Desktop\\UNIVERSIDAD\\ALBERTO\\PFC\\modelos2Dfemm")

global Variable ;
Cargar_Variables_Rodamiento
Dibujar_geometrias_rodamiento
Cargar_materiales_y_condiciones_de_contorno
Materiales_y_condiciones_herradura
if (Variable.Configuración == 0)
printf ("configuración polos independientes seleccionada...\n");

%%% Inicio la tarea de mi programa

printf("Abriendo FEMM (Iniciando conexión de Octave a FEMM...\n");
openfemm % Abrimos el FEMM
printf("Creando documento de FEMM para simulación magnética...\n");
newdocument(0); % Creamos nuevo documento de femm magnético
printf("Especificando características del problema...\n");
mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, Variable.Depth, 30); %
Especificamos las características del problema en femm

%% Dibujo el rodamiento magnético
printf("Dibujando geometrias del rodamiento...\n");
Dibujarrodamiento(); % Dibuja el cojinete magnético
%% Aplicación de los materiales a cada parte del rodamiento, características técnicas y
condición de contorno
printf("Aplicando materiales, circuitos y condiciones de contorno...\n");
Materialesrodamiento(); % Aplica las propiedades definidas al rodamiento magnético
% Se hace un zoom del rodamiento magnético en FEMM, no es necesario visualizar el
entorno entero
mi_zoom(-Variable.Radioexterior,-Variable.Radioexterior,Variable.Radioexterior,Variable.
Radioexterior)
% Se guarda el archivo con el nombre que deseemos sin espacios y con extensión .FEM
mi_saveas('RodamientoProgramado.FEM')

% Se hace una simulación con FEMM----
printf("Analizando...\n");
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;
printf("Resultado de la simulación obtenido!!!\n");
else
printf ("configuración herradura seleccionada...\n");
%%% Inicio la tarea de mi programa
printf("Abriendo FEMM (Iniciando conexión de Octave a FEMM...\n");
openfemm % Abrimos el FEMM
printf("Creando documento de FEMM para simulación magnética...\n");
newdocument(0); % Creamos nuevo documento de femm magnético
printf("Especificando características del problema...\n");
mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, Variable.Depth, 30); %
Especificamos las características del problema en femm
%% Dibujo el rodamiento magnético
printf("Dibujando geometrias del rodamiento...\n");
Dibujarrodamiento(); % Dibuja el cojinete magnético
%% Aplicación de los materiales a cada parte del rodamiento, características técnicas y
condición de contorno
printf("Aplicando materiales, circuitos y condiciones de contorno...\n");
Materialesrodamientoherradura()
% Se hace un zoom del rodamiento magnético en FEMM, no es necesario visualizar el
entorno entero
mi_zoom(-Variable.Radioexterior,-Variable.Radioexterior,Variable.Radioexterior,Variable.
Radioexterior)
% Se guarda el archivo con el nombre que deseemos sin espacios y con extensión .FEM
mi_saveas('RodamientoProgramado.FEM')
% Se hace una simulación con FEMM----
```

```
printf("Analizando...\n");
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;
printf("Resultado de la simulacion obtenido!!!\n");
endif
```

9.5.2 CARGAR LAS VARIABLES DEL RODAMIENTO.

```
%%% Cargar las variables del rodamiento %%%

Variable.Radioexterior=63.75 % Variable que define el radio del Estator
Variable.Radorotor=15.75 % Variable que define el radio del Rotor
Variable.Gap=0.78 % Variable que define la distancia entre el Rotor y los Polos
Variable.Anchopolo=7.2 % Variable que define la anchura de los Polos
Variable.Anchoexterior=10.5 % Variable que define la anchura del estator
Variable.Nopolos=8 % Variable que define el numero de Polos
Variable.Anchobobina=4.5 % Variable que define en mm lo que sobresale cada Bobina del
Polo
Variable.Corriente=4 % Variable que define la corriente que circula en cada Bobina
Variable.Corriente2=2 % Variable que define la corriente que circula en cada Bobina en
la simulacion de postprocesado
Variable.Diferenciali=0.2 % Variable que define la corriente que circula en cada Bobina
Variable.Noespiras=300 % Variable que define el numero de espiras de la bobina
Variable.Depth=64 % Variable que define la profundidad en el "eje Z"
Variable.PermabilidadRelativa=1950 % Variables para aplicar a un material concreto con
el que trabajar
Variable.ConductividadFerromagnetico=2.08333333333
Variable.ConductividadConductor=58
Variable.traslacionx=Variable.Gap/10 %postprocesado cambios de posicion
Variable.traslaciony=Variable.Gap/10
Variable.Nomedidas=6 %numero de medidas en los calculos de postprocesado
Variable.Mallado= 0.9 %tamaño de mallado
Variable.Configuracion=1 % Variable que determina la configuracion del rodamiento
% Variable.Configuracion=0 ----> Configuracion Polos
independientes
% Variable.Configuracion=1 ---->Configuracion en Herradura
(solo válida para numero par de herraduras)
% 4 polos (2 herraduras)
% 8 polos (4 herraduras)
```

9.5.3 SCRIPT DE DIBUJO DE RODAMIENTO.

```
%% En esta rutina definimos una función de octave, como ejemplo de su uso
1; %% def esta primera sentencia para que entienda que el fichero contiene funciones
(misterios de la informática)
function Dibujarrodamiento()
%% En esta función los datos se transpasan en el objeto Modelo
global Variable ; %% Esta función contiene una variable global tipo objeto estructura de
datos (data estructura object)
%%% Dibujar las geometrias del rodamiento %%%

%dibujo el polo

mi_drawrectangle(-
Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap,Variable.Anchopolo/2,
Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior);

%dibujo el estator
mi_drawarc(Variable.Radioexterior,0,-Variable.Radioexterior,0,180,1);
mi_drawarc(-Variable.Radioexterior,0,Variable.Radioexterior,0,180,1);

%dibujo el rotor
mi_drawarc(-Variable.Radorotor,0,Variable.Radorotor,0,180,1);
mi_drawarc(Variable.Radorotor,0,-Variable.Radorotor,0,180,1);
mi_selectarcsegment(0,Variable.Radorotor);
mi_selectarcsegment(0,-Variable.Radorotor);
mi_setgroup(1);

%borro segmentos inutiles
mi_selectsegment(0,Variable.Radorotor+Variable.Gap); mi_selectsegment(0,Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior);
mi_deletesegment; mi_clearselected;
```

```

%copio y roto segmentos del polo
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_selectsegment(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior);
mi_copyrotate2(0,0,360/Variable.Nopolos,Variable.Nopolos-1,1);

%añado arco del interior del polo, lo copio y lo roto
mi_addarc(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap,-Variable.Anchopolo/2,
Variable.Radorotor+Variable.Gap,40,1);
mi_selectarcsegment(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_copyrotate2(0,0,360/Variable.Nopolos,Variable.Nopolos-1,3);

%añado arco que une los polos en el estator, copio y roto ese arco
mi_addarc(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior,-Variable.
Anchopolo/2-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior)*sin(2*pi/Variable.Nopolos),
Variable.Anchoexterior+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchoexterior)*cos(2*pi/Variable.Nopolos),360/Variable.Nopolos,1);
mi_selectarcsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchoexterior);
mi_copyrotate2(0,0,360/Variable.Nopolos,Variable.Nopolos-1,3);

% Dibujo bobina derecha
mi_drawrectangle(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.Gap
+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4,-
Variable.
Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.
Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4);

% selecciono segmentos correspondientes a la bobina derecha
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina/2,Variable.Radorotor+Variable.
Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-Variable.Anchobobina/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-
Variable.Radorotor)/4);

%copio y traslado los segmentos de la bobina derecha para dibujar la bobina izquierda
mi_copytranslate2(Variable.Anchopolo+Variable.Anchobobina,0,1,1);

%selecciono todos los segmentos de las bobinas izq y der
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina/2,Variable.Radorotor+Variable.
Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-Variable.Anchobobina/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-
Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(Variable.Anchopolo/2+Variable.Anchobobina/2,Variable.Radorotor+Variabl
e.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4)
mi_selectsegment(Variable.Anchopolo/2+Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.
Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(Variable.Anchopolo/2+Variable.Anchobobina/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-
Variable.Radorotor)/4);

%copio y roto las bobinas para asignar un par a cada polo
mi_copyrotate2(0,0,360/Variable.Nopolos,Variable.Nopolos-1,1);
mi_clearselected;
endfunction
-

```

9.5.4 CARGAR MATERIALES CONFIGURACIONES Y DEMAS CONDICIONES TÉCNICAS.

9.5.4.1 POLOS INDEPENDIENTES

```

1; %% def esta primera sentencia para que entienda que el fichero contiene funciones
(misterios de la informática)
function Materialesrodamiento()
%% En esta función los datos se transpasan en el objeto Variable
global Variable ; %% Esta función contiene una variable global tipo objeto estructura de
datos
% Se cargan los siguientes materiales de la librería de FEMM y se crean los materiales
necesarios para el rodamaniento magnético
mi_getmaterial("Copper");
mi_getmaterial("Air");
mi_getmaterial("Pure Iron");
mi_addmaterial("Silicon steel 3%",Variable.PermeabilidadRelativa, Variable.
PermeabilidadRelativa, 0, 0, Variable.ConductividadFerromagnetico, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0,
0 );
TENER LAS CARACTERISTICAS REQUERIDAS POR EL USUARIO Y PUEDE COLOCARSE DONDE SE QUIERA
%añado las propiedades de circuito que necesito para el problema
mi_addcircprop ('Idc', Variable.Corriente, 1);
%añado las condiciones de contorno
mi_addboundprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
%coloco puntos de blocklebel en las distintas zonas del rodamiento
mi_addblocklabel(0,Variable.Radioexterior-2); mi_selectlabel(0,Variable.Radioexterior-
2);
mi_setblockprop("Silicon steel 3%",0,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(0,0); mi_selectlabel(0,0);
mi_setblockprop("Silicon steel 3%",0,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_setblockprop('Air',0,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioex
terior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc',0,0,Variable.Noespiras);
mi_copyrotate2(0,0,360/Variable.Nopolos,Variable.Nopolos-1,2); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2); mi_selectlabel(-
Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc',0,0,-Variable.Noespiras);
mi_copyrotate2(0,0,360/Variable.Nopolos,Variable.Nopolos-1,2); mi_clearselected;
%selecciono los arcos del estator y les aplico las condiciones de contorno
mi_selectarcsegment(0,Variable.Radioexterior); mi_selectarcsegment(0,-
Variable.Radioexterior);
mi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial',0,0); mi_clearselected;
endfunction
-

```

9.5.4.2 BOBINAS EN HERRADURA

```

1; %% def esta primera sentencia para que entienda que el fichero contiene funciones
(misterios de la informática)
function Materialesrodamientoherradura()
%% En esta función los datos se transpasan en el objeto Variable
global Variable ; %% Esta función contiene una variable global tipo objetoestructura de
datos
% Se cargan los siguientes materiales de la librería de FEMM y se crean los materiales
necesarios para el rodamaniento magnético

mi_getmaterial("Copper");
mi_getmaterial("Air");
mi_getmaterial("Pure Iron");
mi_addmaterial("M_270",Variable.PermeabilidadRelativa, Variable.PermeabilidadRelativa,
0, 0,
Variable.ConductividadFerromagnetico, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0 );

%añado las propiedades de circuito que necesito para el problema
mi_addcircprop ('Idc', Variable.Corriente, 1);

```

```

%añado las condiciones de contorno
mi_addboundprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);

%coloco puntos de blocklebel en las distintas zonas del rodamiento

mi_addblocklabel(0,Variable.Radioexterior-2); mi_selectlabel(0,Variable.Radioexterior-2);
mi_setblockprop("M_270", 0, Variable.Mallado, 0, 0, 1, 0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(0,0); mi_selectlabel(0,0);
mi_setblockprop("M_270", 0, Variable.Mallado, 0, 0, 1, 0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_setblockprop('Air',1,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_clearselected;

if (Variable.Nopolos == 4)
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2); mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,-Variable.Noespiras); mi_copyrotate2(0,0,90,1,2);
mi_clearselected;
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2); mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,Variable.Noespiras); mi_copyrotate2(0,0,90,1,2);
mi_clearselected;
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5); mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,Variable.Noespiras); mi_copyrotate2(0,0,-90,2,2);
mi_clearselected;
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo/2-1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,-Variable.Noespiras); mi_copyrotate2(0,0,-90,2,2);
mi_clearselected;
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_deleteselcted;
else
printf ("seleccionando tipo de herradura...\n");
endif
if (Variable.Nopolos == 8)
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2); mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,Variable.Noespiras); mi_copyrotate2(0,0,45,1,2);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_copyrotate2(0,0,180,1,2);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_copyrotate2(0,0,225,1,2); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2); mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,-Variable.Noespiras); mi_copyrotate2(0,0,45,1,2);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_copyrotate2(0,0,180,1,2);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_copyrotate2(0,0,225,1,2); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);

```



```

mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,-Variable.Noespiras); mi_copyrotate2(0,0,-
45,2,2);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_copyrotate2(0,0,-225,1,2);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_copyrotate2(0,0,-270,1,2);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_deleteselcted;
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo/2-1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-
1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-
Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,Variable.Noespiras); mi_copyrotate2(0,0,-45,2,2);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-
1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-
Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5); mi_copyrotate2(0,0,-225,1,2);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_copyrotate2(0,0,-270,1,2);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-1.5,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2+1.5);
mi_deleteselcted;
else
printf ("resolviendo...\n");
endif
%selecciono los arcos del estator y les aplico las condiciones de contorno
mi_selectarcsegment(0,Variable.Radioexterior); mi_selectarcsegment(0,-
Variable.Radioexterior);
mi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial',0,0); mi_clearselcted;
endfunction
-

```

9.5.5 VARIACIONES DIFERENCIALES DE CORRIENTE

```

openfemm;
newdocument(0);
mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, Variable.Depth, 30);

%%%dibujo el polo%%

mi_drawrectangle(-
Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap,Variable.Anchopolo/2,
Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior);

%borro segmentos inutiles
mi_selectsegment(0,Variable.Radorotor+Variable.Gap); mi_selectsegment(0,Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior);
mi_deleteselcted; mi_clearselcted;
mi_addarc(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap,-Variable.Anchopolo/2,
Variable.Radorotor+Variable.Gap,40,1);
mi_drawrectangle(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4,-Variable.
Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina/2,Variable.Radorotor+Variable.
Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-Variable.Anchobobina/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-
Variable.Radorotor)/4);
mi_copytranslate2(Variable.Anchopolo+Variable.Anchobobina,0,1,1);

%copio segmentos del polo
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_selectsegment(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior);
mi_selectarcsegment(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.

```



```

Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment (-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment (-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment (-Variable.Anchopolo/2-Variable.Anchobobina/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-
Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment (Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment (Variable.Anchopolo/2+Variable.Anchobobina/2,Variable.Radorotor+Variabl
e.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4)
mi_selectsegment (Variable.Anchopolo/2+Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.
Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment (Variable.Anchopolo/2+Variable.Anchobobina/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-
Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment (-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior)
mi_selectsegment (Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+3)
mi_setgroup(2); mi_clearselected;

mi_selectgroup(2)
mi_moverotate(0,0,22.5);
mi_selectgroup(2);
mi_copyrotate2(0,0,45,7,4);
mi_clearselected;
%dibujo el estator
mi_drawarc(Variable.Radioexterior,0,-Variable.Radioexterior,0,180,1);
mi_drawarc(-Variable.Radioexterior,0,Variable.Radioexterior,0,180,1);
%dibujo el rotor

mi_drawarc(-Variable.Radorotor,0,Variable.Radorotor,0,180,1);
mi_drawarc(Variable.Radorotor,0,-Variable.Radorotor,0,180,1);
mi_selectarcsegment(0,Variable.Radorotor);
mi_selectarcsegment(0,-Variable.Radorotor);
mi_setgroup(1);
mi_addarc((Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior)*cos((67.5*3.14159)/180)-
2,(Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior)*sin((67.5*3.14159)/180)+2,-
(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchoexterior)*cos((67.5*3.14159)/180)+2,(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchoexterior)*sin((67.5*3.14159)/180)+2,45,1)
mi_selectarcsegment(0,Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior);
mi_copyrotate2(0,0,45,7,3)

%% fin parte de dibujo%%

%% Materiales y condiciones de contorno%%

mi_getmaterial("Copper");
mi_getmaterial("Air");
mi_getmaterial("Pure Iron");
mi_addmaterial("Silicon steel 3%",Variable.PermeabilidadRelativa, Variable.
PermeabilidadRelativa, 0, 0, Variable.ConductividadFerromagnetico, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0,
0);
mi_addcircprop ('Idc',Variable.Corriente,1);
mi_addcircprop ('Idc2',Variable.Corriente2,1);
mi_addboundprop('Tangencial',0,0,0,0,0,0,0,0,0);
mi_addblocklabel(0,Variable.Radioexterior-2); mi_selectlabel(0,Variable.Radioexterior-
2);
mi_setblockprop("Silicon steel 3%",0,Variable.Mallado,0,0,1,0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(0,0); mi_selectlabel(0,0);
mi_setblockprop("Silicon steel 3%",0,Variable.Mallado,0,0,1,0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(0,Variable.Radorotor+1); mi_selectlabel(0,Variable.Radorotor+1);
mi_setblockprop('Air',1,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel (-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel (-Variable.Anchopolo/2-
1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-
Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc',0,0,Variable.Noespiras);
mi_moverotate(0,0
,-67.5);
mi_addblocklabel (-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.

```

```

Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(-
Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.
Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);

mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc',0,0,Variable.Noespiras);
mi_moverotate(0,0
,-130);
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(
Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc',0,0,-Variable.Noespiras);
mi_moverotate(0,
0,-70);
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioex
terior-Variable.
Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc',0,0,-Variable.Noespiras);
mi_moverotate(0,
0,-95);
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-
1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.
Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc2',0,0,Variable.Noespiras);
mi_moverotate(0,
0,67.5);
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-
1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.
Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc2',0,0,Variable.Noespiras);
mi_moverotate(0,
0,95);
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioex
terior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc2',0,0,-Variable.Noespiras);
mi_moverotate(0,0,63);
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioex
terior-Variable.
Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,'Idc2',0,0,-Variable.Noespiras);
mi_moverotate(0,0,130);
mi_addblocklabel(3*Variable.Anchopolo,(Variable.Radioexterior/2));
mi_selectlabel(3*Variable.
Anchopolo,(Variable.Radioexterior/2));
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_copyrotate2(0,0,45,1,2);
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo,(Variable.Radioexterior/2));
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo,(Variable.Radioexterior/2));
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_copyrotate2(0,0,45,1,2);
mi_addblocklabel(-3*Variable.Anchopolo,-(Variable.Radioexterior/2)); mi_selectlabel(-3*
Variable.Anchopolo,-(Variable.Radioexterior/2));
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_copyrotate2(0,0,45,1,2);
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo,-(Variable.Radioexterior/2)); mi_selectlabel(-
Variable.Anchopolo,-(Variable.Radioexterior/2));
mi_setblockprop('Copper',0,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_copyrotate2(0,0,45,1,2);

mi_selectarcsegment(0,Variable.Radioexterior); mi_selectarcsegment(0,-
Variable.Radioexterior);
mi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial',0,0); mi_clearselected;

mi_saveas('Variacionesdecorriente.FEM')
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;

%% Bucle de calculo de postprocesado%%

```

```

for k=1:Variable.Nomedidas
mi_modifcycircprop('Idc',1,Variable.Corriente+(Variable.Diferenciali*k))
mi_modifcycircprop('Idc2',1,Variable.Corriente-(Variable.Diferenciali*k))
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;
mo_selectblock(0,0)
Variable.fx(k)=mo_blockintegral(18)
Variable.fy(k)=mo_blockintegral(19)
Variable.variaciondei(k)=Variable.Diferenciali*k
End

%% Grafica de resultados%%
plot(Variable.variaciondei,Variable.fx,'r')
title('Fuerza en funcion de variacion de corriente')
xlabel('Diferencial entre bobinas / A')
ylabel('Fuerza / N')
legend('Fuerza en eje x')
grid
-

```

9.5.6 DESPLAZAMIENTO DEL ROTOR HACIA LA BOBINA

```

openfemm;
newdocument(0);
mi_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, Variable.Depth, 30);

%%dibujo el polo%%
mi_drawrectangle(-
Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap,Variable.Anchopolo/2,
Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior);

%borro segmentos inutilles
mi_selectsegment(0,Variable.Radorotor+Variable.Gap); mi_selectsegment(0,Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior);
mi_deleteselected; mi_clearselected;
mi_addarc(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap,-Variable.Anchopolo/2,
Variable.Radorotor+Variable.Gap,40,1);
mi_drawrectangle(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4,-Variable.
Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-Variable.Anchobobina/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-
Variable.Radorotor)/4);
mi_copytranslate2(Variable.Anchopolo+Variable.Anchobobina,0,1,1);

%copio segmentos del polo
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_selectsegment(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior);
mi_selectarcsegment(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-
Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.Gap
+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(-Variable.Anchopolo/2-Variable.Anchobobina/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-
Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment(Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment(Variable.Anchopolo/2+Variable.Anchobobina/2,Variable.Radorotor+Variabl
e.Gap
+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/4)

```

```

mi_selectsegment (Variable.Anchopolo/2+Variable.Anchobobina,Variable.Radorotor+Variable.
Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectsegment (Variable.Anchopolo/2+Variable.Anchobobina/2,Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-Variable.Gap-
Variable.Radorotor)/4);
mi_selectsegment (-Variable.Anchopolo/2,Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior)
mi_selectsegment (Variable.Anchopolo/2,Variable.Radorotor+Variable.Gap+3)
mi_setgroup(2); mi_clearselected;

mi_selectgroup(2)
mi_moverotate(0,0,22.5);
mi_selectgroup(2);
mi_copyrotate2(0,0,45,7,4);
mi_clearselected;

%dibujo el estator
mi_drawarc(Variable.Radioexterior,0,-Variable.Radioexterior,0,180,1);
mi_drawarc(-Variable.Radioexterior,0,Variable.Radioexterior,0,180,1);

%dibujo el rotor
mi_drawarc(-Variable.Radorotor,0,Variable.Radorotor,0,180,1);
mi_drawarc(Variable.Radorotor,0,-Variable.Radorotor,0,180,1);
mi_selectarcsegment(0,Variable.Radorotor);
mi_selectarcsegment(0,-Variable.Radorotor);
mi_setgroup(1);
mi_addarc((Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior)*cos((67.5*3.14159)/180)-
2,(Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior)*sin((67.5*3.14159)/180)+2,-
(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchoexterior)*cos((67.5*3.14159)/180)+2,(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchoexterior)*sin((67.5*3.14159)/180)+2,45,1)
mi_selectarcsegment(0,Variable.Radioexterior-Variable.Anchoexterior);
mi_copyrotate2(0,0,45,7,3)
%%%% fin parte de dibujo%%%%
mi_getmaterial("Copper");
mi_getmaterial("Air");
mi_getmaterial("Pure Iron");
mi_addmaterial("Silicon steel 3%",Variable.PermeabilidadRelativa, Variable.
PermeabilidadRelativa, 0, 0, Variable.ConductividadFerromagnetico, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0,
0);
mi_addcircprop ('Idc', Variable.Corriente, 1);
mi_addboundprop('Tangencial', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
mi_addblocklabel(0,Variable.Radioexterior-2); mi_selectlabel(0,Variable.Radioexterior-
2);
mi_setblockprop("Silicon steel 3%", 0, Variable.Mallado, 0, 0, 1, 0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(0,0); mi_selectlabel(0,0);
mi_setblockprop("Silicon steel 3%", 0, Variable.Mallado, 0, 0, 1, 0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(0,Variable.Radorotor+1); mi_selectlabel(0,Variable.Radorotor+1);
mi_setblockprop('Air',1,Variable.Mallado,0,0,0,0); mi_clearselected;
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(-Variable.Anchopolo/2-
1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-Variable.Anchopolo-
Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,Variable.Noespiras); mi_moverotate(0,0,-67.5);
mi_addblocklabel(-Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(-
Variable.Anchopolo/2-1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,Variable.Noespiras); mi_moverotate(0,0,-130);
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(
Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,Variable.Noespiras); mi_moverotate(0,0,-70);
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.
Radioexterior-Variable.Anchoexterior-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_selectlabel(
Variable.Anchopolo/2+1,Variable.Radorotor+Variable.Gap+(Variable.Radioexterior-
Variable.Anchopolo-Variable.Gap-Variable.Radorotor)/2);
mi_setblockprop('Copper',1,0,'Idc',0,0,Variable.Noespiras); mi_moverotate(0,0,-95);
mi_addblocklabel(3*Variable.Anchopolo,(Variable.Radioexterior/2));
mi_selectlabel(3*Variable.Anchopolo,(Variable.Radioexterior/2));
mi_setblockprop('Copper',1,0,0,0,0,0); mi_copyrotate2(0,0,45,5,2)
mi_addblocklabel(Variable.Anchopolo,(Variable.Radioexterior/2));
mi_selectlabel(Variable.Anchopolo,(Variable.Radioexterior/2));
mi_setblockprop('Copper',1,0,0,0,0,0); mi_copyrotate2(0,0,45,5,2);

```

```

mi_selectarcsegment(0,Variable.Radioexterior); mi_selectarcsegment(0,-
Variable.Radioexterior);
mi_setarcsegmentprop(1,'Tangencial',0,0); mi_clearselected;
mi_saveas('Movimientosderotor.FEM')
mi_analyze(0);
mi_loadsolution;

for k=1:Variable.Nomedidas
mi_selectgroup(1)
mi_movetranslate2(Variable.traslacionx,0,3)
mi_analyze(0)
mi_loadsolution
mo_selectblock(0,0)
Variable.fx(k)=mo_blockintegral(18)
Variable.fy(k)=mo_blockintegral(19)
Variable.movimientoex(k)=Variable.traslacionx*k
end
plot(Variable.movimientoex,Variable.fx,'r')
title('Fuerza en funcion de variacion de Gap')
xlabel('desplazamiento del rotor / mm')
ylabel('Fuerza / N')
legend('Fuerza en eje x')
grid

```

9.6 IMÁGENES RODAMIENTO EXPERIMENTAL DE 8 POLOS

